



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA  
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA  
(POLO 58 - UFRPE)**

**José Adauto dos Reis Costa**

**UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA: APRENDIZAGEM  
DOS CONCEITOS DE ENTROPIA E SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal Rural de Pernambuco, no Curso de Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF), polo 58-UFRPE, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador:

Prof. Dr. Ramón E. R. González

Recife,  
Novembro de 2022

UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA: APRENDIZAGEM  
DOS CONCEITOS DE ENTROPIA E SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA.

José Aduino dos Reis Costa

Orientador:

Prof. Dr. Ramón E. R. González

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal Rural de Pernambuco, no Curso de Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF), polo 58-UFRPE, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

---

Prof. Dr. RAMON ENRIQUE RAMAYO GONZALEZ  
UFRPE - Presidente

---

Prof. Dr. GUSTAVO CAMELO NETO  
UFPE – Membro Titular Externo

---

Prof<sup>ª</sup>. Dra.. SARA CRISTINA PINTO RODRIGUES  
UFRPE – Membro Titular Interno

Recife,  
Novembro de 2022

C837u Reis Costa, José Aauto dos  
Unidade de Ensino Potencialmente Significativa: Aprendizagem dos  
Conceitos de Entropia e Segunda Lei da Termodinâmica / José Aauto dos  
Reis Costa - Recife: UFRPE / IF, 2022.  
viii, 77 f.: il.;30cm.  
Orientador: Ramón E. R. González  
Dissertação (mestrado) – UFRPE / Pró-Reitoria de Pós Graduação /  
Programa de Pós-Graduação Profissional em Ensino de Física, 2022.  
Referências Bibliográficas: f. 74-77.  
1. Ensino de Física. 2. Entropia. 3. Temperaturas absolutas  
negativas. I González., Ramón E. R. II. Universidade Federal Rural de  
Pernambuco, Pró-Reitoria de Pós-Graduação, Programa de Pós-Graduação  
em Ensino de Física. III. Unidade de Ensino Potencialmente significativa:  
Aprendizagem dos conceitos de entropia e segunda lei da Termodinâmica

Dedico esta dissertação a toda minha família por todo apoio, em especial à minha mãe.

## **Agradecimentos**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Primeiramente agradecer a Deus por me dar forças suficientes para cumprir minha jornada, À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e à Sociedade Brasileira de Física (SBF), pela oferta, em conjunto, do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, possibilitando a capacitação em nível de mestrado, em pleno exercício da profissão, de professores atuantes no ensino de Física na educação básica neste mestrado; Em especial, ao professor Ramón González, meu orientador, por toda disponibilidade e ajuda do início ao fim deste projeto, à minha esposa pela compreensão nos momentos de ausência por conta do tempo empregado aos estudos.

## RESUMO

### **UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA: APRENDIZAGEM DOS CONCEITOS DE ENTROPIA E SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA.**

José Aduino dos Reis Costa

Orientador:

Prof. Dr. Ramón E. R. González

Esta proposta de Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) visa contribuir para a ocorrência de aprendizagem significativa no Ensino de Física, porque neste enfoque os conceitos são abordados de maneira progressiva em nível de complexidade, a avaliação é feita durante toda a implementação e não somente ao final do processo de ensino/aprendizagem, com estratégias que estimulam a criatividade do aluno, relacionando os conceitos com assuntos presentes no cotidiano do aluno. Lembrando que, apesar da UEPS construída ser potencialmente significativa, esta deve ser adaptada ao público e aos conhecimentos dos alunos.

Essa metodologia, que engloba diversificadas atividades, desde individuais até colaborativa (em grupos), favorece a participação dos alunos de forma mais ativa no processo de ensino/aprendizagem, propiciando uma construção do conhecimento mais rica em significados, portanto, construímos uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa para aprendizagem dos conceitos de Entropia, fazendo abordagem estatística da temperatura, entropia e temperatura negativa, culminando com a reformulação da 2ª Lei da Termodinâmica.

Palavras-chave: Ensino de Física, Unidade de Ensino Potencialmente Significativa, Entropia.

Recife,  
Novembro de 2022

## **ABSTRACT**

### **POTENTIALLY SIGNIFICANT TEACHING UNIT: LEARNING OF ENTROPY CONCEPTS AND THE SECOND LAW OF THERMODYNAMICS**

José Aduino dos Reis Costa

Orientador:

Prof. Dr. Ramón E. R. González

This Potentially Significant Teaching Unit (PSTU) proposal aims to contribute to the occurrence of meaningful learning, because the concepts are approached progressively in terms of complexity, the evaluation is carried out during the entire implementation and not only at the end of the teaching/learning process, with strategies that stimulate the student's creativity, relating the concepts with subjects present in the student's daily life. Bearing in mind that, although the PSTU constructed is potentially significant, it must be adapted to the public and to the students' knowledge.

This methodology, which encompasses several and diversified activities, from individual to collaborative (in groups), favors the participation of students in a more active way in the teaching/learning process, providing a construction of knowledge richer in meanings, therefore, we built a Potentially Significant Teaching for learning the concepts of Entropy, the statistical approach to temperature, temperature that culminates with the reformulation of the 2nd Law of Thermodynamics.

Keywords: Keywords: Physics Teaching, Potentially Significant Teaching Unit, Entropy.

Recife,  
Novembro de 2022

## Sumário

Capítulo 1- Introdução	9
1. 1. Conceitos pedagógicos empregados	11
1. 2. Trabalhando os conceitos físicos	11
1. 3. A dissertação em capítulos	12
Capítulo 2 - A Pesquisa em Ensino de Física: O conceito de entropia	14
Capítulo 3 – Fundamentação Teórica (Educativa)	17
3.1 Teoria da aprendizagem significativa.	17
3.2 Teoria da educação de Novak.	21
3.3 Unidade de ensino potencialmente significativa	24
3.4 Integrando os PCNEM à proposta	28
Capítulo 4 – Fundamentação Teórica (Física)	32
4.1 Entropia: Temperatura absoluta negativa e reformulação da 2ª lei da Termodinâmica	31
4.2 Entropia	33
4.3 Análise física do conceito de entropia	34
4.4 Definição estatística da entropia	36
4.5 Definição termodinâmica da temperatura	40
4.6 Temperatura absoluta negativa	40
Capítulo 5 – Aplicação do produto educacional	50
Capítulo 6 - Resultados	58
Capítulo 7 - Conclusões e perspectivas	62
Referências bibliográficas	67
Apêndice A - O produto educacional	69
Referências bibliográficas	80

## Capítulo 1 Introdução

Temos observando desde o início de nossa atividade profissional como professores de Física, que a estrutura apresentada pela maioria dos livros de Física do Ensino Médio apresenta a segunda lei da termodinâmica com uma abordagem do ponto de vista macroscópico e é centrada na análise de máquinas térmicas. Não há, até onde sabemos, iniciativas abrangentes de se apresentar a segunda lei no ensino médio a partir do ponto de vista microscópico.

O que se observa é que os livros de Física aprovados no Plano Nacional do Livro Didático (PNLD) de 2019, inicialmente apresentam o conceito de entropia que pode ser entendido somente como grau de desordem, distorcendo sua definição e ofuscando a compreensão deste conceito. Realizamos a observação desses livros e chegamos às seguintes definições de entropia: a) a entropia definida como medida da desordem, b) entropia definida como dispersão de energia.

O interesse por esse tema começou a partir da observação do professor Dr. Héctor Raúl Montagne Dugrós (professor do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) em relação à parte dedicada à Entropia no livro *Os Alicerces da Física*, da Editora Saraiva, no qual ficou constatado que o conceito de entropia dado nesse livro carecia de outros elementos para defini-lo como também uma relação mais clara com a segunda lei da termodinâmica.

Muitas vezes os alunos se sentem desmotivados, por não entenderem bem os conceitos que estão sendo repassados, ficam desatentos. Apresentar aos alunos os conceitos de forma que eles entendam bem como sua aplicabilidade contribui para gerar um sentimento de importância, despertando a motivação e o desejo de querer aprender, num processo de construção do conhecimento que visem a compreenderem os fenômenos naturais e sua aplicabilidade.

Sabemos que a escolha de estratégias a serem utilizadas em sala de aula para facilitar a compreensão dos conceitos não é uma tarefa fácil. O professor deve ter clareza de seus objetivos e compreensão dos conceitos que deseja que seus alunos se apropriem.

Com o objetivo de construir um referencial que se distanciasse da aprendizagem mecânica, com uma aprendizagem de maior qualidade que possa sanar as dificuldades de conceitos de Física, especificamente Entropia e Segunda Lei, elaboramos uma

Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) (MOREIRA, 2012), que são sequências de ensino fundamentadas na TAS que visam atuar como facilitadora da aprendizagem significativa

Uma UEPS é composta por etapas que buscam promover a aprendizagem significativa. Recomenda-se que sejam seguidos oito passos sequenciais em sua elaboração, que servem como guia para elaboração dessas unidades, cabendo a nós, professores, buscar a melhor forma de segui-los adaptando-os a nossa realidade escolar.

Sendo assim, com a finalidade de favorecer a aprendizagem dos estudantes, especificamente, nosso público-alvo, uma turma do Ensino Médio Integrado, do Instituto Federal de Pernambuco – Campus Barreiros, no total de 18 alunos. Portanto, apresentamos a seguir uma proposta de Unidade de Ensino Potencialmente Significativa, tendo como enfoque principal o conceito de Entropia cuja abordagem estatística nos levará ao conceito de temperatura absoluta negativa.

## **1. 1. CONCEITOS PEDAGÓGICOS EMPREGADOS**

A Teoria da Aprendizagem utilizada para facilitação da aprendizagem é a Teoria de Aprendizagem Significativa (AUSUBEL, 2000), na qual, a partir dos conhecimentos prévios (conhecimento especificamente relevante já existente na estrutura cognitiva do sujeito que aprende), ideias expressas simbolicamente interagem de maneira substantiva e não arbitrária. Para identificar quais subsunçores os alunos possuíam para a ancoragem dos conceitos de Entropia e Segunda Lei da Termodinâmica (levando-se em consideração temperaturas absolutas negativas), montamos uma aula, na qual, a partir de imagens para que eles fizessem a relação entre Entropia e desorganização. Outras situações também foram criadas como, por exemplo, o número de estados que os átomos podem ocupar, fazendo analogia com um quadro de possibilidades de cores mostrando que quanto maior o número de estados possíveis, menos energia estará disponível para ser utilizada, caso a energia total seja fixa e estejamos nos referindo a energia por estado. Todo passo a passo foi feito dentro da Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS), proposta por (Moreira, 2012) a qual é composta de oito passos: desde os conceitos específicos a serem abordados e os objetivos a serem alcançados, até a avaliação da UEPS onde foi feita uma análise quantitativa e qualitativa sobre as atividades realizadas no desenvolvimento das UEPS, verificando se ocorreu uma aprendizagem significativa. Utilizamos também, como ferramenta de aprendizagens a construção de mapas conceituais propostos por (NOVAK, 1980) como ferramenta para aprendizagem significativa, onde durante a aplicação da UEPS, os alunos construíram mapas conceituais relacionados à entropia.

## **1. 2. TRABALHANDO OS CONCEITOS FÍSICOS**

A partir do quarto passo da UEPS que diz que uma vez trabalhadas as situações iniciais, deve-se aprofundar o conhecimento, levando-se em conta a diferenciação progressiva começando com aspectos mais gerais. Conhecemos os enunciados de Clausius e Kelvin-Planck, da forma que aparecem nos livros, onde as temperaturas absolutas são sempre positivas e construímos o mapa conceitual.

Sabemos que, para sistemas com um número finito e bem definido de possíveis níveis de energia, pode acontecer inversão de população, onde níveis mais elevados de energia podem ficar mais “povoados” do que níveis de baixa energia. Para estes sistemas, nesses estados, a definição estatística de temperatura nos leva a valores

negativos da temperatura do sistema. Nestes casos, a segunda lei da termodinâmica, segundo os enunciados de Clausius e Kelvin, precisou ser revista.

Mostramos que a partir da Primeira Lei da Termodinâmica, quando uma quantidade de calor  $dQ$  é adicionada a um gás ideal, ele se expande realizando um trabalho, o que nos leva à conclusão de que a variação relativa do volume fornece uma estimativa do aumento da desordem ou seja

$$\frac{dV}{V} = \frac{dQ}{T} \quad (1.1)$$

Mostramos também que para altas temperatura uma mudança na entropia em relação a uma pequena mudança na energia será pequena, por outro lado, a baixas temperaturas, uma pequena mudança na energia pode ter um impacto muito grande na entropia,

$$\frac{1}{T} = \frac{dS}{dT}. \quad (1.2)$$

Por fim, fizemos o enunciado de Kelvin-Planck (modificado) e reconstruímos o mapa conceitual, que inicialmente, foi construído só para temperaturas absolutas positivas. O de Clausius não sofre modificações.

A partir daí já pode ser anunciada a Terceira lei da Termodinâmica, cujo detalhe está no capítulo 5, referente à aplicação do produto.

### **1. 3. A DISSERTAÇÃO EM CAPÍTULOS**

Para efeito de investigação, o presente Produto Educacional, divide-se em quatro partes:

No capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica do tema no qual se insere a pesquisa. Para tanto, tomamos como base para a revisão bibliográfica os seguintes periódicos: *Physical Review*, *Revista do Professor de Física*, *Ciência Hoje* e *Revista de Ciência Elementar*, nas quais encontramos temas relacionados com a nossa pesquisa. Na *Physical Review* encontramos o artigo “Conditions for Equilibrium at Negative Absolute Temperatures” muito importante para a definição de temperatura absoluta negative.

O capítulo 3 contém a fundamentação teórico-educacional. Nosso referencial teórico é Ausubel e sua teoria de aprendizagem significativa (AUSUBEL, 2003), uma teoria cognitivista, ou seja, que está relacionada com os processos de assimilação, transformação, organização e armazenamento da informação envolvida na estrutura cognitiva do indivíduo.

No capítulo 4, os temas “Temperatura absoluta negativa e reformulação da 2ª lei da Termodinâmica” são abordados desde o conceito de entropia, introduzido por Clausius, até consequências da sua interpretação estatística,

No capítulo 5, Aplicação do Produto Educacional, visto que nosso público-alvo são alunos do segundo ano do Ensino Médio, detalhamos como foi a aplicação em uma turma do 2º ano desta modalidade de ensino, do Instituto Federal de Pernambuco – Campus Barreiros, PE.

Foram executados os oito passos da sequência didática, que tem o intuito de estimular a pesquisa aplicada em educação e incentivar a prática do uso de teorias de aprendizagem que valorizem o protagonismo dos estudantes.

Os Resultados e conclusões estão no capítulo 6, no qual são apresentados os dados coletados durante a aplicação da UEPS em um quadro que mostra a síntese de cada um dos momentos vivenciados durante a UEPS, a data em que ocorreram, bem como a relação com os passos da UEPS.

## Capítulo 2

### A pesquisa em Ensino de Física: O conceito de entropia e suas implicações.

O estudo da Termodinâmica, especificamente Entropia e Segunda Lei da Termodinâmica é matéria de pesquisa no ensino de Física desde há algum tempo.

Encontramos um artigo na revista “Revista do Professor de Física”, intitulado “Estudo da Termodinâmica no Ensino Médio por meio da Modelagem Científica e Ciclos de Modelagem” (SILVA, DANTAS *et al.*, 2021), no qual os autores investigam o aprendizado da Termodinâmica por meio de modelagem científica por alunos de uma escola pública de ensino médio da cidade de Acopiara - Ceará - Brasil. Nesse estudo, foram explorados modelos representacionais (BUNGE,2017), sobre as Leis da Termodinâmica a partir do funcionamento de um motor de combustão interna de uma motocicleta com o objetivo de perseguir formas diferenciadas de ensino que visem melhorar a prática docente e estimular o desejo dos alunos pela aprendizagem de física. Conceitos fundamentais da Termodinâmica foram problematizados, como entropia por exemplo, enquanto os alunos se comprometeram com o interesse em aprender. instrução por modelagem ajudou os estudantes a entenderem o assunto, e até para revelar dificuldades.

Na revista Ciência Hoje encontramos um artigo intitulado “Micro, macro, quente e frio” (SANTOS, 2022). Neste artigo, o autor confirma que estamos testemunhando uma mudança de *status* na termodinâmica como resultado das atuais capacidades tecnológicas de obtenção de temperatura muito baixas. Ele afirma que:

...para entender o conceito de temperatura, é preciso entender os conceitos de energia interna e entropia de um sistema clássico e de um sistema quântico. Em um sistema clássico, não há limite máximo para a energia cinética de suas partículas. Com o aumento da temperatura, a água aquece, suas moléculas ganham progressivamente mais energia até entrar em ebulição e evaporar. Se o vapor d’água continuar submetido a temperaturas mais altas, as energias cinéticas das suas moléculas continuarão aumentando continuamente (SANTOS, 2022).

E que, nos sistemas quânticos:

A energia não pode variar continuamente, como nos sistemas clássicos. Um exemplo conhecido é o modelo do átomo de Bohr, no qual os elétrons giram em torno do núcleo, mas só podem girar em determinadas órbitas. Portanto, só podem ter determinados valores de energia. Imaginemos um sistema quântico mais simples que o átomo de Bohr: certo número de bolinhas, todas colocadas na prateleira inferior de uma estante de duas prateleiras. Essa é a

situação de entropia mínima, em que o sistema se encontra no seu mais alto grau de organização. (SANTOS, 2022).

E ainda explicou:

Suponha que as bolinhas pulam para a prateleira superior à medida que são aquecidas, aumentando a energia do sistema. Quando cada prateleira for ocupada pela metade das bolinhas, o sistema atingirá seu estado de máxima entropia. Aumentando ainda mais a temperatura, mais bolinhas da prateleira inferior pulam para a superior. Esse processo continua até que todas as bolinhas ocupem a prateleira superior e o sistema volte a ter entropia mínima e energia máxima. É essa situação que origina temperatura absoluta negativa. Isto porque, na primeira parte do ciclo, tanto a energia quanto a entropia crescem com a temperatura. Na segunda, a entropia diminui à medida que a energia cresce. De acordo com a termodinâmica, isso implica temperatura negativa. O fenômeno é conhecido como inversão de população, ou seja, há mais bolinhas no estado de maior energia. Portanto, no estado de temperatura negativa, existem mais bolinhas no estado de maior energia. Por isso esse estado é mais quente do que qualquer outro com temperatura positiva. Como já foi dito, se colocarmos um sistema com temperatura negativa em contato com outro com temperatura positiva, a energia fluirá do primeiro para o segundo (SANTOS, 2022).

Na revista de Ciência Elementar, encontramos apenas um artigo intitulado “Entropia” (RIBEIRO, 2015) no qual o autor explica o conceito de Entropia. Segundo M. Guillen, o próprio Clausius explicou o porquê da palavra entropia: “Construí intencionalmente a palavra entropia de modo a ser tão semelhante quanto possível à palavra energia, pois as duas grandezas encontram-se de tal modo unidas no respectivo significado físico que se afigura desejável uma certa semelhança de designação” (Clausius, Rudolf 1822 – 1888).

Este termo é, muitas vezes, associado ao grau de desordem de um sistema termodinâmico no que se refere à energia dispersa no processo. Qualquer processo termodinâmico implica uma diminuição da energia útil, visto que uma parte da energia desse mesmo processo deixa de estar disponível para a realização de trabalho. Essa diminuição da energia útil do sistema é, por vezes, designada por perda de qualidade da energia, cuja grandeza associada é a entropia.

E acrescenta:

Um exemplo simples do aumento de entropia num sistema termodinâmico é a vaporização de um líquido. Quando a água está a vaporizar-se, passa de um estado físico de relativa organização (líquido) para um estado físico mais caótico (gasoso). Neste caso, a dispersão de energia ocorre como consequência da menor organização das moléculas de água do sistema. Neste exemplo, a vizinhança do sistema arrefece como consequência do fenómeno físico decorrido e, por isso, a sua entropia diminui. No entanto, apesar da diminuição da entropia da vizinhança, se o processo for espontâneo, a entropia do universo aumenta (calculada através da soma da entropia do sistema com a entropia da vizinhança) (Ribeiro, 2015).

Na *Physical Review* encontramos um artigo intitulado “Conditions for Equilibrium at Negative Absolute Temperatures” (COLEMAN, NOLL, 1959), foi mostrado que na temperatura negativa o estado de equilíbrio de um sistema tem sua energia mais alta.

No próximo capítulo, apresentaremos a fundamentação teórica educacional, na qual serão detalhados a teoria da aprendizagem utilizada bem como a sequência didática utilizada no nosso trabalho.

## Capítulo 3

### Fundamentação Teórica (Educativa)

#### 3.1. TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

Ausubel, (2000) elaborou a teoria da aprendizagem significativa, na década de 60 que é uma teoria cognitivista, ou seja, que está relacionada com os processos de assimilação, transformação, organização e armazenamento da informação envolvidos na estrutura cognitiva do indivíduo.

Na teoria da aprendizagem significativa uma nova informação é assimilada de forma não arbitrária e não literal pelo subsunçor, que é o conhecimento específico relevante que o sujeito que aprende possui na sua estrutura cognitiva. Ausubel dava aos conceitos estruturantes de cada disciplina que deveriam ser identificados e ensinados aos alunos e que, uma vez aprendidos, significativamente, serviriam de ancoragem para novas aprendizagens significativas. Subsunoçores seriam, então, conhecimentos prévios especificamente relevantes para a aprendizagem de outros conhecimentos, conforme afirma Moreira (MOREIRA, 2017):

Uma das condições para a ocorrência da aprendizagem significativa, portanto, é que o material a ser aprendido seja relacionável (ou incorporável) à estrutura cognitiva do aprendiz, de maneira não arbitrária e não literal. Um material com essas características é dito potencialmente significativo. Esta condição implica não só que o material seja suficientemente não arbitrário em si, de modo que possa ser aprendido, mas também que o aprendiz tenha disponível em sua estrutura cognitiva os subsunoçores adequados. A outra condição é que o aprendiz manifeste uma disposição para relacionar de maneira substantiva e não arbitrária o novo material, potencialmente significativo, a sua estrutura cognitiva (MOREIRA, 2017, p. 164).

Sobre o conceito de subsunçor, Moreira (2017) afirma que:

[...] à medida que o conhecimento prévio serve de base para a atribuição de significados à nova informação, ele também se modifica, ou seja, os subsunoçores vão adquirindo novos significados, se tornando mais diferenciados, mais estáveis. São formados novos subsunoçores que interagem entre si. Neste sentido a estrutura cognitiva está constantemente se reestruturando durante a aprendizagem significativa. O processo é dinâmico; o conhecimento vai sendo construído (MOREIRA, 2010, p. 18).

É importante enfatizar aqui que o material só pode ser potencialmente significativo. Não existe livro significativo, nem aula significativa, nem problema significativo, pois o significado está nas pessoas, não nos materiais. É o aluno que atribui significados aos materiais de aprendizagem e os atribuídos podem não ser aqueles aceitos no contexto da matéria de ensino. conforme afirma Moreira (MOREIRA, 2011):

Naturalmente, no ensino, o que se pretende é que o aluno atribua aos novos conhecimentos, veiculados pelos materiais de aprendizagem, os significados aceitos no contexto da matéria de ensino, mas isso normalmente depende de um intercâmbio, de uma “negociação” de significados, que podem ser bastante demorada (MOREIRA, 2011, p. 25).

E ainda:

Predisposição para aprender e aprendizagem significa guardam entre si uma relação praticamente circular: a aprendizagem significativa requer predisposição para aprender e, ao mesmo tempo, gera esse tipo de experiência afetiva [...] (MOREIRA, 2011, p.13).

Sendo assim, ao conhecer os subsunçores existentes na estrutura cognitiva do estudante, o professor terá informações sobre como deverá organizar as atividades de aprendizagem, de modo que estes sejam levados em consideração. Para que isso ocorra com boas chances de sucesso, Ausubel (2000) sugere os organizadores prévios que se entende como atividades a serem planejadas e propostas com base nos subsunçores identificados, salientando, também, que estes podem não existir ou serem insuficientes, ou, ainda, existirem, mas não serem identificados pelo estudante, no momento em que o novo conhecimento está sendo apresentado.

Assim, Ausubel explica que

[...]os organizadores prévios são mecanismos pedagógicos que ajudam a implementar os princípios da diferenciação progressiva e da reconciliação integradora, estabelecendo a ligação entre o que o aprendiz já sabe e o que precisa de saber, caso pretenda apreender e reter, de forma eficaz, novos materiais de instrução. [...] O uso desses organizadores é uma estratégia que visa manipular a estrutura cognitiva de modo a possibilitar a AS. A função deles após interagir com os subsunçores relevantes na estrutura cognitiva, é fornecer um apoio ideário para a incorporação e retenção estável do material mais detalhado e diferenciável que se segue à passagem de aprendizagem (2003, p.151).

Essas estratégias de manipulação cognitiva são fundamentais para a construção de conceitos significativos diante do objeto de estudo. Entende-se também que, para que ocorra aprendizagem significativa, é necessário que se estabeleçam relações nas quais emergem os significados para o aprendiz, modificando as ideias iniciais. As condições necessárias para que ocorra a aprendizagem significativa constam na proposição de Moreira e Mansini (2001, p.23);

- a) O material a ser aprendido seja potencialmente significativo para o aprendiz, ou seja, relacionável a sua estrutura de conhecimento de forma não arbitrária e não literal (substantiva); b) O aprendiz manifeste uma disposição de relacionar o novo material de maneira substantiva e não arbitrária a sua estrutura cognitiva.

A principal função dos organizadores prévios é servir de ponte entre o que o aluno sabe e o que ele deve saber para que aprenda de maneira significativa o material estudado, os organizadores prévios funcionam então como pontes cognitivas. Essas pontes cognitivas são definidas por Ausubel (2003, p.3) como o “processo de interação entre conceitos e saberes já organizados na estrutura cognitiva do aprendiz e aquilo que se aprende” e também são definidas pelo autor como um processo de assimilação, como se destaca a seguir:

A teoria da assimilação explica a forma como se relacionam de modo seletivo, na face da aprendizagem, novas ideias potencialmente significativas do material de instrução com ideias relevantes, e, também, mais gerais e inclusivas (bem como mais estáveis), existentes (ancoradas) na estrutura cognitiva. Estas ideias relevantes ancoradas e o produto principal desta interação torna-se, para o aprendiz, o significado das ideias de instrução acabadas de introduzir. Estes novos significados emergentes são, depois, armazenados (ligados) e organizados no intervalo de retenção (memória) com as ideias ancoradas correspondentes (AUSUBEL, 2003, p. 8).

Esses organizadores podem servir de ideias-âncora relevantes para a aprendizagem do novo material quando estabelecem relações entre ideias proposições e conceitos já existentes na estrutura cognitiva e aqueles contidos no material de aprendizagem, isto é, relaciona aquele conhecimento que o aluno tem, com o novo, sem que ele perceba essa relação.

Organizadores prévios são materiais introdutórios, apresentados antes dos conteúdos a serem aprendidos. Eles servem de ancora para nova aprendizagem e levam ao desenvolvimento de conceitos subsunçores que facilitem a aprendizagem subsequente (MOREIRA, 1999, p.155).

Quanto aos princípios da diferenciação progressiva e da reconciliação integradora, de acordo com Teorias de Aprendizagem Significativa, trata-se de dois momentos distintos de aprendizagem.

O processo de assimilação sequencial de novos significados, a partir de sucessivas exposições a novos materiais potencialmente significativos, resulta na diferenciação progressiva de conceitos ou proposições, no conseqüente aperfeiçoamento dos significados e numa potencialidade melhorada para se fornecer ancoragem a aprendizagens significativas posteriores (AUSUBEL, 2003, p. 6).

E ainda:

A reconciliação integradora tem a tarefa facilitada no ensino expositivo, se o professor e/ou os materiais de instrução anteciparem e contra-atacarem, explicitamente, as semelhanças e diferenças confusas entre novas ideias e ideias relevantes existentes e já estabelecidas nas estruturas cognitivas dos aprendizes (AUSUBEL, 2003, p. 6).

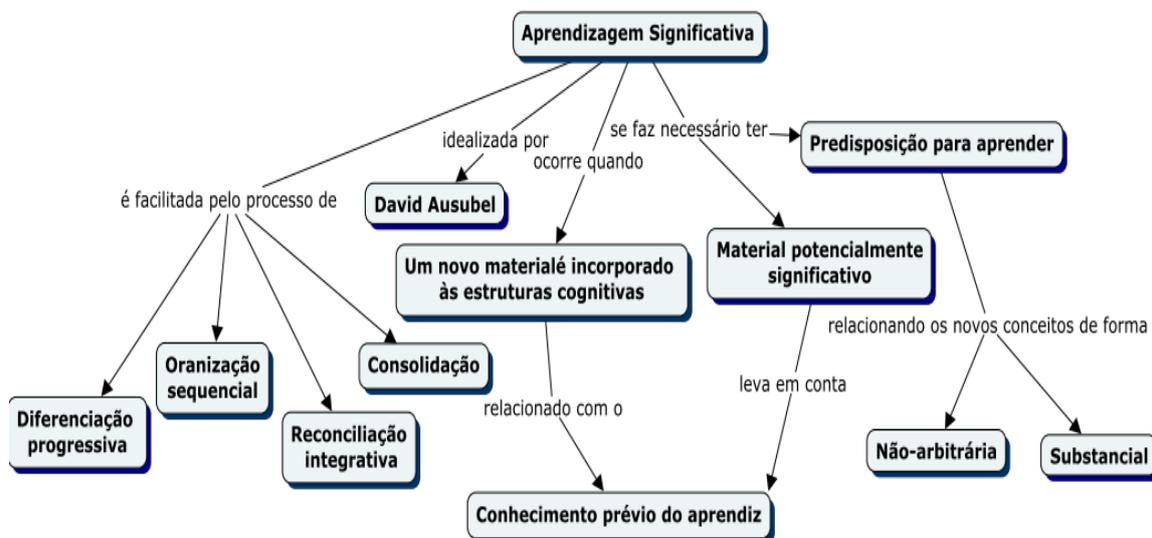
Diante dessas considerações, entende-se que, para que haja uma Aprendizagem Significativa, deve ocorrer uma interação entre o novo conceito e seus subsunçores, implicando assim a utilização de materiais adequados para esse fim. Para tanto, “...um mecanismo ou abordagem intencional significativos da aprendizagem, tal como já foi indicado, apenas ocorrem num processo e em resultado da aprendizagem significativa, desde que o próprio material de aprendizagem seja potencialmente significativo”. (AUSUBEL, 2003, p. 57).

(MOREIRA; MANSINI, 2006) também ressaltam que, para que a aprendizagem seja significativa, o material deve ser potencialmente significativo, fazer sentido para o estudante e estabelecer uma relação do que já se sabe com o novo conhecimento. Por sua vez, um material potencialmente significativo precisa ser elaborado de forma abrangente a todo o conteúdo a ser estudado, criando possibilidades de aprendizagens de ordem crescente, a fim de serem sanadas suas dificuldades. Óbvio, porém não observado. O ensino escolar não é organizado de modo a levar em conta o conhecimento prévio do aluno.

Além disso,

Materiais potencialmente significativos apresentam características importantes como a capacidade de relação não arbitrária e não literal para com ideias particulares relevantes na estrutura cognitiva do aprendiz e a capacidade de relação com a estrutura cognitiva particular de um aprendiz em particular (AUSUBEL, 2003, p. 58).

**Figura 3.1 – Mapa Conceitual da Aprendizagem Significativa**



Fonte: Elaborado pelo autor

O mapa da figura 3.1 mostra o processo da aprendizagem significativa, destacando os elementos principais dessa teoria, que nos auxilia no processo de ensino e de aprendizagem, mostrando a importância de identificar em nossos alunos o conhecimento prévio. Ponto muito importante que será fundamental nesse trabalho junto com organizadores prévios, pois é algo que pode motivar os alunos a aprenderem.

Nosso organizador prévio são imagens com as quais o aluno interage para relacionar o conceito de entropia à desordem, bem com algumas imagens relacionadas à temperatura e suas respectivas escalas

### 3.2 TEORIA DA EDUCAÇÃO DE NOVAK

Teorias são ideias que explicam as razões do comportamento de um determinado conjunto de fenômenos do universo. As ciências têm sido muito bem sucedidas na invenção de teorias e, embora até as melhores evoluam e mudem ao longo dos tempos, continuam a tornar possível um avanço constante no conhecimento sobre a forma como o mundo natural funciona e na previsão e controle de um leque cada vez mais amplo de casos ou fenômenos (NOVAK, 2000, p.8).

A Teoria de Educação de Novak surge a partir da necessidade de se entender o porquê de algumas experiências educacionais funcionarem e outras não, além de mostrar as provas para este funcionamento. Esta teoria busca dar visão e orientação para novas práticas e investigações, que levem a um melhoramento firme da educação (NOVAK, 2000, p. 8), é o que o próprio autor chama de uma teoria polivalente de educação:

O Ato de educar é mais do que uma ciência; é também uma arte. Exige decisões, sentimentos e valores pessoais (NOVAK, 2000, p. 8).

A Educação, de acordo com esta teoria, tem como objetivo principal o de capacitar os formandos para serem responsáveis pela própria construção de significados. Essa construção envolve necessariamente três fatores essenciais: o pensamento, o sentimento e a ação. A ideia é que estes fatores sejam integrados tanto à aprendizagem quanto à criação de novos significados. O autor não considera o aluno apenas um ser pensante, mas também um ser que sente e que age. Uma teoria de educação eficaz precisa levar em conta o ser que aprende como um todo e não apenas uma parte deste. Novak considera que uma “experiência educacional positiva aumenta a capacidade das pessoas das pessoas pensarem, sentirem e ou agirem em experiências posteriores” (NOVAK, 2000, p.9), caso contrário, ocorre uma diminuição desta capacidade. A combinação do pensar, sentir e agir, no ser humano, contribui para o mesmo formar os significados das experiências diárias.

Novak é um grande colaborador da teoria da aprendizagem significativa. Coube a ele continuar o trabalho de Ausubel. Ele, no entanto, criou a teoria da educação que engloba a teoria de Ausubel. Esta teoria parte da ideia de que a educação se divide em três partes: cognitiva, afetiva e psicomotora e que, devidamente integradas e articuladas, proporcionam o pleno desenvolvimento do educando, o engrandecimento do indivíduo.

As premissas básicas de teoria de Novak é que os seres humanos fazem três coisas: pensam, sentem e atuam (fazem). Uma teoria de educação, segundo ele, deve considerar um desses elementos e ajudar a explicar como se pode melhorar as maneiras por meio das quais os seres humanos pensam, sentem e atuam (fazem) (Moreira 2017, p.176).

Na teoria de Novak, a educação possui cinco elementos essenciais: aprendiz, professor, conhecimento, contexto e avaliação. É o que afirma Moreira (2010)

De alguma maneira, em um evento educacional, um ser humano adquire conhecimento, em um certo contexto, interagindo com o professor (algo que o substitua). A avaliação encaixa ai porque muito do que acontece no processo ensino-aprendizagem-conhecimento-contexto depende da valiação ou, como propõem Novak, muito do que acontece na vida das pessoas depende da avaliação (MOREIRA, 2017, p. 176).

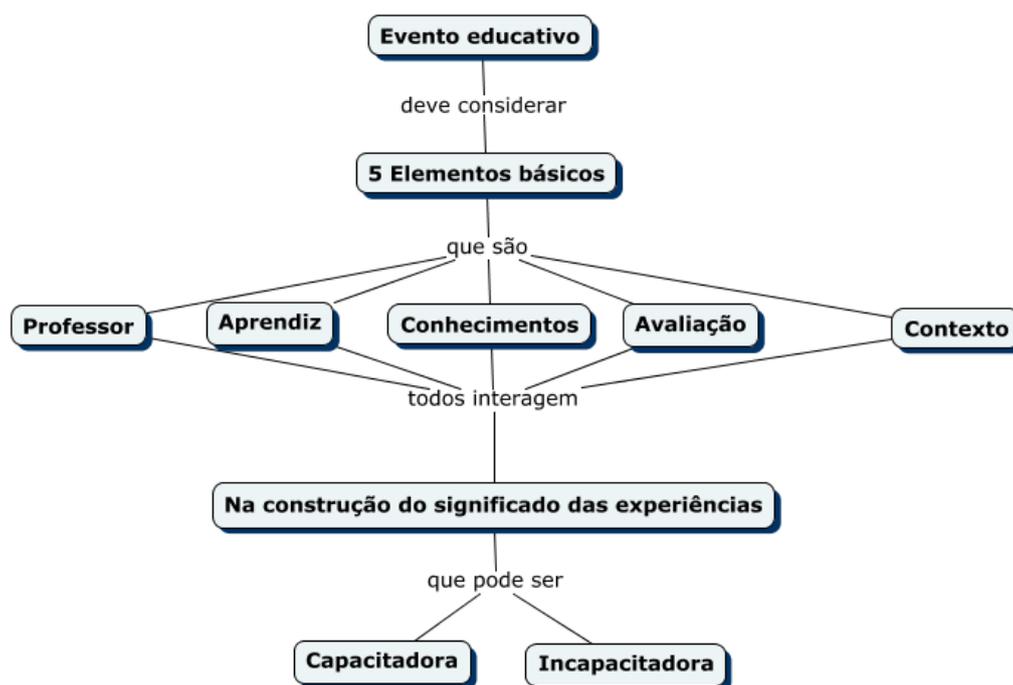
Os cinco elementos propostos fazem com que seja proporcionada uma troca de significados e sentimentos entre professor e aluno contribuindo para uma melhor aprendizagem. Novak (1981) ressalta que as experiências afetivas que o aluno tem de um evento educativo criam predisposição para que ele aprenda. Na teoria da educação de Novak (1981), surgiu o conceito de mapas conceituais, que são representações

gráficas utilizadas para ordenar sequências hierarquizadas de conteúdo, de modo que o conteúdo apresentado seja significativo para o aluno. Tal conceito advém da teoria de Ausubel.

Ausubel sustenta o ponto de vista de que cada disciplina acadêmica tem uma estrutura articulada e hierarquicamente organizada de conceitos que constitui o sistema de informações dessa disciplina. [...] Esses conceitos estruturais podem ser identificados e ensinados ao estudante, constituindo para ele um sistema de processamento de informações, um verdadeiro mapa intelectual que pode ser usado para analisar o domínio particular da disciplina e nela resolver problemas (MOREIRA; MASINI, 2006, p. 42).

O objetivo do mapa conceitual é apresentar o conhecimento de forma clara oferecendo estímulo adequado a aprendizagem. Os mapas conceituais podem ser utilizados de diversas maneiras no ensino aprendizagem, desde a organização do conteúdo até sua avaliação. Portanto, levando-se em conta os elementos da educação propostos por Novak, os quais favorecem a aproximação entre o professor e o aluno, criando um ambiente favorável para uma interação que oportunize significados e sentimentos, os mapas conceituais reforçam a aprendizagem significativa de Ausubel, encontrando neste um forte aliado.

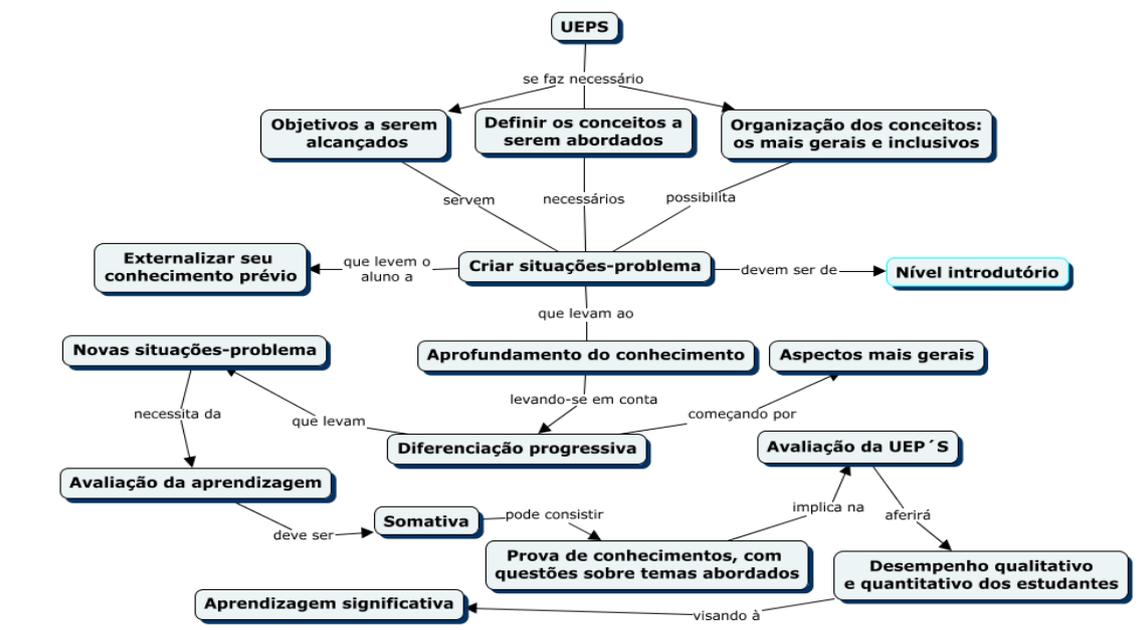
Figura 3.2 – Os cinco elementos que compõem um evento educacional



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.3 UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA

Figura 3.3 – Mapa conceitual – Unidade de Ensino Potencialmente Significativa



Fonte: Elaborado pelo autor

Na busca por metodologias que facilitem o aprendizado significativo, (RIBEIRO, 2015) explica que “qualquer sistema educacional deve estar alicerçado no estímulo constante para o desenvolvimento de motivações e de interesses através de um processo de

ensino e aprendizagem por excelência provocativo, significativo e apropriado à construção do conhecimento pelo indivíduo.”

Ao propor a construção da Unidade de Ensino Potencialmente Significativa, Moreira propôs objetivo, filosofia, marco teórico, princípios, aspectos sequenciais, diagramas e aspectos transversais que norteiam a elaboração deste instrumento metodológico. No objetivo da UEPS, ele propõe “desenvolver unidades de ensino potencialmente facilitadoras da aprendizagem significativa de tópicos específicos de conhecimento declarativo e/ou procedimental.”

Na elaboração da Unidade de Ensino Potencialmente Significativa, é de suma importância seguir alguns passos para uma boa elaboração e, conseqüentemente, exitosa aplicação e resultados. O detalhamento de como serão as etapas dessa UEPS definidas por Moreira (2011).

São seqüências de ensino fundamentadas teoricamente, voltadas para a aprendizagem significativa, não mecânica, que podem estimular a pesquisa aplicada em ensino, aquela voltada diretamente à sala de aula. MOREIRA,2011).

Usamos uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEP’S) pois o conceito desta faz parte dos abordados por Ausubel, dentre os quais encontram-se os subsunçores. Na escola tradicional, os professores ensinam aos alunos os conceitos que eles deveriam saber, em contrapartida, os alunos copiam e decoram os conceitos informações que só serão utilizadas na hora da prova tradicional e depois, provavelmente, esquecem-se, Moreira (2011). Esse modelo configura a forma mecânica de ensino.

Para Moreira, essas UEPS mostram aspectos sequenciais que devem ser seguidos na sua criação:

**1. Definir o tópico a ser abordado:** Nesse aspecto, devemos identificar as características declarativas e procedimentais que serão aceitas no conteúdo deste tópico.

**2. Propor situações-problema em nível introdutório:** identificamos os conhecimentos prévios dos alunos com o objetivo de posteriormente introduzir o conhecimento necessário. É nesse aspecto que utilizaremos os organizadores prévios que facilitarão a incorporação do material a ser aprendido significativamente, pois esses “ancoram-se”

nos conteúdos preexistentes dos alunos. Para Moreira e Mazini (1982), organizador prévio é:

“Material introdutório apresentado antes do material a ser aprendido, porém em nível mais alto de generalidade, inclusividade e abstração do que o material em si e, explicitamente, relacionado às ideias relevantes existentes na estrutura cognitiva e à tarefa de aprendizagem. Destina-se a facilitar a aprendizagem significativa, servindo de ponte entre o que o aprendiz já sabe e o que ele precisa saber para que possa aprender o novo material de maneira significativa. É uma espécie de ponte cognitiva (MOREIRA e MASINI, 1982, p. 103).”

O objetivo desta etapa é propor uma situação inicial (discussão, questionário, mapa conceitual, mapa mental, situação-problema etc.) que ajude os estudantes a externalizarem seus conhecimentos prévios. Após a coleta dos conhecimentos prévios deve-se ocorrer a identificação. A ideia é que ainda nessa segunda etapa você possa planejar as próximas etapas da sequência de ensino levando em conta os conhecimentos prévios identificados. Nosso objetivo nesse momento não é avaliar os conhecimentos prévios, mas identificá-los, logo, pode-se usar no meu planejamento os conhecimentos prévios adequados ou não para aprendizagem.

**3. Propor situações-problema, em nível bem introdutório, levando em conta o conhecimento prévio do aluno:** É importante destacar que a situação-problema tem o objetivo de preparar o terreno para a introdução do conhecimento que se pretende ensinar; estas situações-problema podem envolver, desde já, o tópico em pauta, mas não para começar a ensiná-lo; tais situações-problema podem funcionar como organizador prévio; são as situações que dão sentido aos novos conhecimentos, mas, para isso, o aluno deve percebê-las como problemas e deve ser capaz de modelá-las mentalmente; estas situações-problema iniciais podem ser propostas através de simulações computacionais, demonstrações, vídeos, problemas do cotidiano, representações veiculadas pela mídia, problemas clássicos da matéria de ensino, etc., mas sempre de modo acessível e problemático, isto é, não como exercício de aplicação rotineira de algum algoritmo.

**4. Processo da diferenciação progressiva:** Essa etapa é um aprofundamento teórico, mas esse aprofundamento não vai acontecer de qualquer jeito. Vai ser orientado pelo processo da diferenciação progressiva, começando com aspectos mais gerais, inclusivos, dando uma visão inicial do todo, do que é mais importante na unidade de ensino, mas logo exemplificando, abordando aspectos específicos; a estratégia de ensino pode ser, por exemplo, uma breve exposição oral seguida de atividade colaborativa em pequenos

grupos que, por sua vez, deve ser seguida de atividade de apresentação ou discussão em grande grupo;

**5. Novas situações-problema:** Nesta etapa ocorre a proposta de novas situações-problema, em nova apresentação (que pode ser através de outra breve exposição oral, de um recurso computacional, de um texto, etc.), porém em nível mais alto de complexidade em relação à primeira apresentação; as situações-problema devem ser propostas em níveis crescentes de complexidade; dar novos exemplos, destacar semelhanças e diferenças relativamente às situações e exemplos já trabalhados, ou seja, promover a reconciliação integradora; após esta segunda apresentação, propor alguma outra atividade colaborativa que leve os alunos a interagir socialmente, negociando significados, tendo o professor como mediador; esta atividade pode ser a resolução de problemas, a construção de uma mapa conceitual ou um diagrama V, um experimento de laboratório, um pequeno projeto, etc., mas deve, necessariamente, envolver negociação de significados e mediação docente;

**6º Processo da reconciliação integradora:** Concluindo a unidade, ocorre um novo aprofundamento teórico, mas o objetivo não é apresentar novos conteúdos, mas retomar as características mais relevantes do conteúdo em questão, porém de uma perspectiva integradora, ou seja, buscando as semelhanças e diferenças entre os conceitos apresentados, de forma, a simplificá-los. A reconciliação integrativa; isso deve ser feito através de nova apresentação dos significados que pode ser, outra vez, uma breve exposição oral, a leitura de um texto, o uso de um recurso computacional, um áudio-visual, etc.; o importante não é a estratégia, em si, mas o modo de trabalhar o conteúdo da unidade; após esta terceira apresentação, novas situações-problema devem ser propostas e trabalhadas em níveis mais altos de complexidade em relação às situações anteriores; essas situações devem ser resolvidas em atividades colaborativas e depois apresentadas e/ou discutidas em grande grupo, sempre com a mediação do docente;

**7º Avaliação Somativa Individual:** Nesta etapa corre a aplicação de uma avaliação somativa individual propondo questões/situações que impliquem compreensão, que evidenciem captação de significados e, idealmente, alguma capacidade de transferência; tais questões/situações deverão ser previamente validadas por professores experientes na

matéria de ensino; a avaliação do desempenho do aluno na UEPS deverá estar baseada, em pé de igualdade, tanto na avaliação formativa (situações, tarefas resolvidas colaborativamente, registros do professor) como na avaliação somativa.

**8º Avaliação da Aprendizagem:** Avaliação da aprendizagem através da UEPS deve ser feita ao longo de sua implementação, registrando tudo que possa ser considerado evidência de aprendizagem significativa (compreensão, captação de significados, clareza, capacidade de explicar e aplicar os conceitos novas situações-problema). A aprendizagem significativa é progressiva, o domínio de um campo conceitual é progressivo; por isso, a ênfase em evidências, não em comportamentos finais.

### **3.4 INTEGRANDO OS PCNEM À PROPOSTA**

Respeitando as diretrizes para o Ensino Médio, que preceitua que este tipo de ensino deve oferecer, de forma articulada, uma educação equilibrada, com funções equivalentes para todos os educandos:

1. A formação da pessoa, de maneira a desenvolver valores e competências necessárias à integração de seu projeto individual ao projeto da sociedade em que se situa;
2. O aprimoramento do educando como pessoa humana, incluindo a formação ética e o desenvolvimento da autonomia intelectual e do pensamento crítico;
3. A preparação e orientação básica para a sua integração ao mundo do trabalho, com as competências que garantam seu aprimoramento profissional e permitam acompanhar as mudanças que caracterizam a produção no nosso tempo;

Nosso desafio é, portanto, buscar meios para concretizar esses novos horizontes, especialmente dentro da realidade escolar hoje existente no país. Como conseguir realizar tanto com tão pouco espaço, tempo, recursos materiais, com as carências formativas e afetivas dos alunos, nas condições de trabalho dos professores? Passada a tempestade inicial, nós, professores de Física, temos ousado mudar, utilizado novas formas de ensinar.

Os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+) veem a Física com uma disciplina que:

Apresenta-se como um conjunto de competências específicas que permitam perceber e lidar com os fenômenos naturais e tecnológicos, presentes tanto no cotidiano mais imediato quanto na compreensão do universo distante, a partir de princípios, leis e modelos por ela construídos. Isso implica, também, na introdução à linguagem própria da Física, que faz uso de conceitos e terminologia bem definidos, além de suas formas de expressão, que envolvem, muitas vezes, tabelas, gráficos ou relações matemáticas. Ao mesmo tempo, a Física deve vir a ser reconhecida como um processo cuja construção ocorreu ao longo da história da humanidade, impregnada de contribuições culturais, econômicas e sociais, que vem resultando no desenvolvimento de diferentes tecnologias e, por sua vez, por elas impulsionado (BRASIL, PCN+, 2004, p. 59).

Dessa forma, dentre os temas da Física e seus conteúdos, em destaque neste trabalho os temas Entropia e Segunda Lei da Termodinâmica, serão frutos do tempo e de significativa importância no tocante à compreensão de mundo.

Para permitir um trabalho mais integrado entre todas as áreas de Ciências da Natureza, e destas com Linguagens e Códigos e Ciências Humanas, as competências em Física foram já organizadas nos PCNEM de forma a explicitar os vínculos com essas outras áreas. Assim, há competências relacionadas principalmente com a investigação e compreensão dos fenômenos físicos, enquanto há outras que dizem respeito à utilização da linguagem física e de sua comunicação, ou, finalmente, que tenham a ver com sua contextualização histórico e social (PCNEM, 2017, p.62).

No quadro abaixo colocamos as competências que devem ser desenvolvidas pelos alunos, quando da utilização da sequência didática que tem como enfoque a construção de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS), que tem como objetivo favorecer a ocorrência da aprendizagem significativa dos conceitos de Termodinâmica.

<b>Investigação e compreensão</b>	
Ler, articular e interpretar símbolos e códigos em diferentes linguagens e representações: sentenças, equações, esquemas, diagramas, tabelas, gráficos e	<ul style="list-style-type: none"> <li>• compreender que tabelas, gráficos e expressões matemáticas podem ser diferentes formas de representação de uma mesma relação, com potencialidades e limitações próprias, para ser capaz de</li> </ul>

representações geométricas.	escolher e fazer uso da linguagem mais apropriada em cada situação, além de poder traduzir entre si os significados dessas várias linguagens.
-----------------------------	---

<b>Representação e Comunicação</b>	
Identificar fenômenos naturais ou grandezas em dado domínio do conhecimento científico, estabelecer relações; identificar regularidades, invariantes e transformações.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar regularidades, associando fenômenos que ocorrem em situações semelhantes para utilizar as leis que expressam essas regularidades na análise e previsões de situações do dia-a-dia.</li> </ul>

<b>Contextualização histórico e social.</b>	
Compreender o conhecimento científico e o tecnológico como resultados de uma construção humana, inseridos em um processo histórico e social.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• compreender a construção do conhecimento físico como um processo histórico, em estreita relação com as condições sociais, políticas e econômicas de uma determinada época. Compreender, por exemplo, a transformação da visão de mundo geocêntrica para a heliocêntrica, relacionando-a às transformações sociais que lhe são contemporâneas, identificando as resistências, dificuldades e repercussões que acompanharam essa mudança.</li> </ul>

## Capítulo 4

### Fundamentação Teórica Física

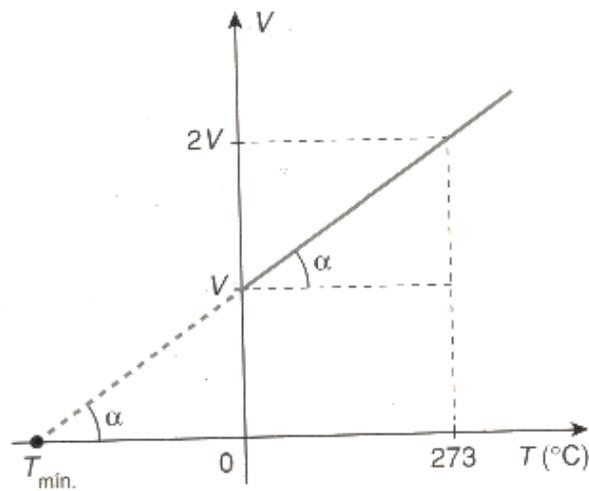
#### 4.1 Entropia: Temperatura absoluta negativa e reformulação da 2ª lei da Termodinâmica

A evolução tecnológica que ocorreu a partir da revolução industrial do começo do século XIX trouxe consigo algumas questões relacionadas ao processo de fundição que exigia altas temperaturas. A primeira foi até que ponto seria possível aquecer um corpo? A experiência vem mostrando, cada vez mais que não há limite para isso. Temperaturas de algumas centenas de graus Celsius, que eram consideradas altas há cem anos, ficaram insignificantes diante de outras que conhecemos, como, por exemplo, as de algumas dezenas de milhões de graus Celsius no interior das estrelas.

A segunda questão foi: até que ponto seria possível resfriar um corpo? Tentando responder a essa pergunta a essa pergunta William Thomson (1824-1907), homenageado com o título de Lord Kelvin, estudou o comportamento dos gases. Ele verificou que todos os gases, na faixa em que podemos considerá-los gases ideais, se dilatam numa mesma proporção, em relação ao volume inicial, quando se mantem a pressão constante. As escalas em que Kelvin trabalhava eram as disponíveis à época, como, por exemplo, a Celsius. O gráfico da figura 9 ilustra uma parte de sua análise. À medida que aumenta a temperatura do gás seu volume também aumenta. Reciprocamente, à medida, à medida que diminui a temperatura do gás, seu volume também diminui.

Até que ponto é possível diminuir o volume de um gás? Até ficar nulo? Essa discussão nos leva a uma concepção de estrutura da matéria, em particular dos gases, junto com o conceito de temperatura. Como vimos, uma temperatura mais alta indica maior agitação molecular e, portanto, maior energia cinética média. Assim, a menor temperatura possível é aquela em que a energia cinética média seja nula (hipoteticamente). As partículas estariam em repouso, e não há como ser mais lento que o repouso. Nessa temperatura o volume livre entre as partículas seria nulo. Esse modelo para a estrutura de um gás gerou resultado de acordo com as experiências.

**Figura 4.1** – Variação do volume do gás com a temperatura sob pressão constante



Fonte: Caron, Wilson, 1941. p. 270

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (4.1)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2V - V}{273 - 0} \quad (4.2)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{V}{273} \quad (4.3)$$

O ponto em que a reta intercepta o eixo das abscissas é o ponto que corresponde ao volume nulo (hipoteticamente). A temperatura referente a esse ponto é obtida por

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{V}{273} \quad (4.4)$$

$$\frac{V}{273} = \frac{V - 0}{0 - T_c} \quad (4.5)$$

$$\frac{V}{273} = \frac{V - 0}{0 - T_c} \quad (4.6)$$

$$T_{min} = -273 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.7)$$

A esse ponto  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ , conhecido como zero absoluto que corresponde ao limite inferior de temperatura, Kelvin atribuiu o valor zero de sua escala ( $0\text{ K} = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Esta assim descoberta, teoricamente, a menor temperatura. **Por essa razão a temperatura termodinâmica se apresenta sempre como positiva.** Para a construção da **escala absoluta**, faltava escolher o tamanho do grau. No caso da escala Kelvin, escolheu-se o mesmo número de divisões da escala Celsius, ou seja, cem divisões entre os pontos de fusão e ebulição da água sob pressão atmosférica normal.

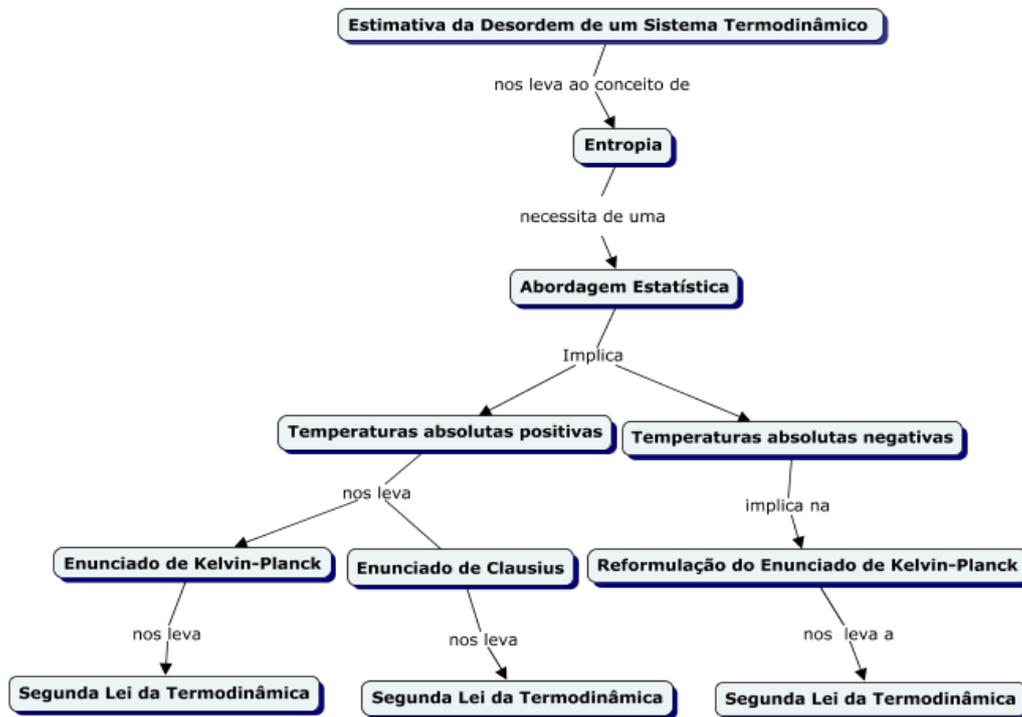
Pela própria definição, uma variação de  $x$  unidade na escala Kelvin corresponde a uma variação de  $x$  unidades na escala Celsius. Assim, qualquer variação de temperatura é representada pelo mesmo valor nas escalas Celsius e Kelvin. Desta forma podemos concluir que, sob pressão atmosférica, o ponto de fusão da água na escala Kelvin corresponde a  $273\text{ K}$  e o de ebulição a  $373\text{ K}$ .

## 4.2 Entropia

Podemos considerar a formulação do conceito de entropia (juntamente com a energia) como uma das grandes realizações da ciência. Permitiu formar o corpo teórico da termodinâmica de equilíbrio e de processos irreversíveis, constitui a pedra fundamental da mecânica estatística e também exerce papel central na teoria da informação

O conceito de entropia foi introduzido por Clausius, na segunda metade do século XIX, a fim de conciliar a teoria de Carnot sobre o funcionamento das máquinas térmicas com as propostas de Joule sobre a equivalência entre calor e energia mecânica. Através de referências históricas e exemplos simples, vamos rever o conceito termodinâmico de entropia e algumas consequências históricas de entropia e algumas consequências da sua interpretação estatística.

Figura 4.1 – Mapa conceitual sobre entropia



Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.3 Análise física do conceito de Entropia

A Segunda Lei da Termodinâmica trata da transferência de energia térmica. Isso quer dizer que ela indica as trocas de calor que têm tendência para igualar temperaturas diferentes (equilíbrio térmico), o que acontece de forma espontânea, bem como, introduz uma função de estado chamada ENTROPIA que permanece constante ou aumenta em qualquer processo possível, em um sistema isolado.

#### Enunciado de Clausius

"É impossível para qualquer sistema operar de maneira que o único resultado seja a transferência de energia sob a forma de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente."

#### Enunciado de Kelvin-Planck

"É impossível para qualquer sistema operar em um ciclo e fornecer uma quantidade líquida de trabalho para as suas vizinhanças enquanto recebe energia por transferência de calor de um único reservatório térmico".

Um reservatório Térmico é definido como um sistema cuja temperatura não varia mesmo que seja adicionada ou removida energia na forma de transferência de calor

A segunda lei da termodinâmica pode ser enunciada a partir de observações experimentais:

É impossível para qualquer sistema sofrer um processo no qual ele absorva calor a uma dada temperatura e converta todo o calor absorvido em trabalho, retornando a um estado idêntico ao inicial.

Alternativamente,

“É impossível que o calor passe espontaneamente de um corpo mais frio para um corpo mais quente”.

A segunda lei da termodinâmica determina o sentido preferencial do processo termodinâmico e introduz uma função de estado chamada ENTROPIA que permanece constante ou aumenta em qualquer processo possível, em um sistema isolado.

A segunda lei da termodinâmica pode ser formulada em termos quantitativos usando o conceito de entropia, que fornece uma estimativa da desordem do sistema. Quando uma quantidade  $dQ$  de calor é adicionada a um gás ideal, ele se expande realizando um trabalho

$$dW = PdV. \quad (4.8)$$

Onde  $P$  é a pressão,  $dV$  é a variação infinitesimal do volume e  $dW$  o trabalho infinitesimal.

Considerando todo calor absorvido pelo sistema, sendo revertido na realização de trabalho pelo próprio sistema, o qual significa que sua energia interna permanece constante, segundo a primeira lei da termodinâmica:

$$dQ = dW \quad (4.9)$$

$$PV = nRT \quad (4.10)$$

$$dQ = nRT dV/V. \quad (4.11)$$

Onde  $dQ$  quantidade infinitesimal de calor fornecida ao sistema,  $PV = nRT$  é equação geral dos gases ideais.

Com a expansão, o gás passa para um estado mais desordenado. Assim, a variação relativa do volume:

$$\frac{dV}{V} \left( \sim \frac{dQ}{T} \right), \quad (4.12)$$

fornece uma estimativa do aumento da desordem. Uma variação  $dS$  da entropia do sistema pode então ser definida a partir da equação 3.4:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (4.13)$$

$$dU = 0 \quad (4.14)$$

Onde  $dU$  é a variação infinitesimal da energia interna do sistema.

$$dQ = dW = PdV = \frac{nRTdV}{V} \quad (4.15)$$

$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T} \quad (4.16)$$

Onde  $dQ_{rev}$  é o calor fornecido ao sistema em um processo reversível.

$$\Delta S = \int \frac{dQ_{rev}}{T} = \int \frac{nRT}{T} \frac{dV}{V} = nR \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V} \quad (4.17)$$

$$\Delta S = nR \ln \frac{V_f}{V_i} > 0 \quad (4.18)$$

Os processos termodinâmicos que ocorrem na natureza são todos irreversíveis. Esses processos são aqueles que ocorrem em determinado sentido senão ocorrem no sentido contrário. Vejamos os exemplos abaixo:

1. Dissipação de energia mecânica
2. Troca de calor
3. Expansão livre
4. Mistura de espécies químicas diferentes
5. Reações químicas

#### 4.4 Definição estatística da entropia

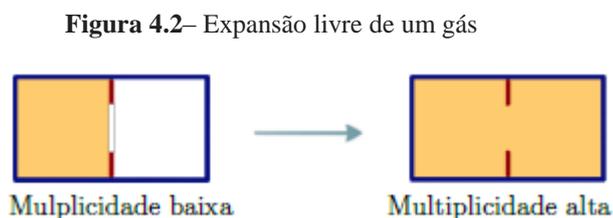
A partir do conceito multiplicidade podemos definir que a entropia de um sistema termodinâmico se relaciona aos microestados que estão associados a um determinado estado macroscópico. Esse estado é caracterizado por quantidades igualmente macroscópicas como o volume  $V$ , o número de partículas  $N$  e a energia interna  $U$  (MOURA,2016 p.26). Sabemos que os diferentes macroestados têm diferentes multiplicidades.

Se considerarmos um balão amarrado com um fio, este balão está associado a macroestados, pois existe pressão, temperatura e volume, assim entropia é função dessas variáveis. Na nossa análise, vamos considerar que o número de partículas e o volume não variam, o que nos leva a considerar a entropia como função apenas da energia, esta, por sua vez variável.

A origem da seta do tempo pode ser compreendida a partir do estudo sobre microestados, macroestados e multiplicidade. Um exemplo tradicional de processo irreversível é a chamada expansão livre de um gás. Uma forma mais simples de se pensar tal expansão é liberarem-se as fronteiras de um sistema de forma que estas possam então se mover, impondo, contudo, que em sua vizinhança haja apenas vácuo. Como não há oposição ao movimento da fronteira, esta expande-se sob pressão nula, e não há trabalho associado. Sendo assim, imaginemos um recipiente dividido em duas partes iguais por uma parede. Um gás ocupa uma dessas partes e a outra está vazia. Se a divisória entre os dois lados for removida, todos sabemos que o gás fluirá para a metade vazia até ocupar uniformemente todo o recipiente, atingindo o que chamamos de estado de equilíbrio. O aumento do volume mediante expansão livre implica, em vista da primeira lei da termodinâmica, a manutenção da energia interna do sistema, visto que as fronteiras são obviamente subentendidas adiabáticas. Apesar das condições antes e depois da expansão livre, e a temperatura final se igualar a temperatura inicial, não se pode dizer que o processo é isotérmico, pois durante a expansão a temperatura se mantém indeterminada. Tal afirmação contudo pode mostrar-se incorreta para outros sistemas nos quais haja uma parcela de energia potencial associada à energia interna do sistema. Esse é um exemplo padrão de irreversibilidade porque, afinal, ninguém diria que o gás pode voltar espontaneamente a ocupar uma metade do recipiente deixando um vácuo na outra.

Para entender a causa dessa irreversibilidade, vamos retornar ao modelo simples de gás do parágrafo anterior. O estado inicial do sistema, no momento da retirada da parede, corresponde a todas as partículas em um dos lados do recipiente. A irreversibilidade surge porque é muito mais fácil ir de um macroestado de baixa multiplicidade, para um de alta multiplicidade do que realizar espontaneamente o caminho inverso. Se o número de partículas for muito grande, ou seja, se o sistema for macroscópico, será praticamente obrigatório ir para o estado de equilíbrio e praticamente impossível sair dele.

A figura 4.2 ilustra essa relação entre a seta do tempo e o aumento da multiplicidade em sistemas macroscópicos. É importante notar que nossa explicação mostra que a seta do tempo é um efeito estatístico, causado pelo fato de vivermos num mundo com muitas partículas. Num mundo microscópico, com poucas partículas, é possível e comum encontrarmos processos reversíveis.



Fonte: MOURA,2016. p.121

Desse ponto de vista estatístico, o estado de equilíbrio corresponderá ao macroestado de maior multiplicidade do sistema. Chegamos com isso a um enunciado da segunda lei da termodinâmica: a multiplicidade de um sistema isolado nunca diminui. Nas palavras de Ludwig Boltzmann, o responsável pela solução estatística da questão da seta do tempo: “Na maioria dos casos o estado inicial será um estado muito improvável”. “A partir dele o sistema evolui rapidamente para estados mais prováveis até finalmente atingir o estado mais provável, isto é, o estado de equilíbrio térmico.” Ou ainda,

“O sistema de partículas sempre evolui de um estado improvável para um estado provável.” (L. Boltzmann, Wien. Ber.)

Uma característica da multiplicidade é que para um sistema composto por dois subsistemas (1 e 2) de multiplicidades  $\Omega_1$  e  $\Omega_2$ , a multiplicidade é determinada pelo produto  $\Omega_1$  e  $\Omega_2$ . Ou seja, a multiplicidade não é uma grandeza aditiva: a multiplicidade da soma não é a soma das multiplicidades. Esse “problema” é resolvido pela introdução de uma nova grandeza, a entropia, representada pela letra S e definida como  $S = k \ln \Omega$  onde k é a constante de Boltzmann, introduzida nessa definição por razões históricas ( $k \cong 1,38 \times 10^{-23}$  J/K). O logaritmo torna a entropia uma grandeza aditiva (ou extensiva, como se diz na termodinâmica). Para um sistema composto por dois subsistemas de entropias  $S_1 = k \ln \Omega_1$  e  $S_2 = k \ln \Omega_2$  a entropia total é a soma das entropias de cada parte:

$$S_1 = k \ln \Omega_1 \tag{4.19}$$

$$S_2 = k \ln \Omega_2 \quad (4.20)$$

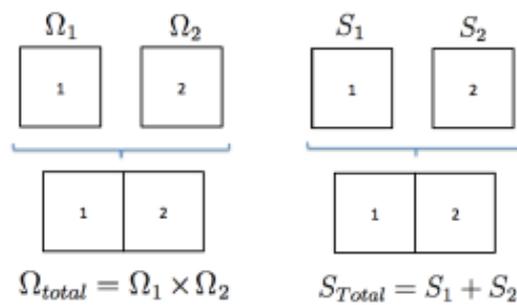
$$S_u = k \ln \Omega_{total} \quad (4.21)$$

$$S_u = k \ln (\Omega_1 \times \Omega_2) \quad (4.22)$$

$$S_u = k \ln \Omega_1 + k \ln \Omega_2 \quad (4.23)$$

$$S_u = S_1 + S_2 \quad (4.24)$$

Figura 4.3: A multiplicidade e entropia de um sistema composto. A entropia é uma grandeza aditiva (extensiva), ao contrário da multiplicidade.



Fonte: MOURA,2016 p.121

Além dessa propriedade, é importante ressaltar que a entropia é sempre positiva, já que  $\Omega \geq 1$ . Ela também é uma função crescente da multiplicidade, ou seja, se a multiplicidade nunca é reduzida num sistema isolado, o mesmo ocorre para entropia. Isso nos leva a reescrever a segunda lei da termodinâmica da seguinte forma: A entropia de um sistema isolado nunca diminui.

Esta é uma das formulações canônicas da segunda lei da termodinâmica. Nenhuma outra lei física define um sentido para a passagem do tempo como essa lei. Como vimos, as leis microscópicas da física não distinguem passado de futuro. Dizer que a entropia de um sistema isolado nunca diminui significa afirmar que ela aumenta ou permanece constante. Se a entropia aumentar durante o processo, este não pode ser revertido, pois isso violaria a segunda lei. Processos desse tipo são ditos irreversíveis, caracterizados por  $\Delta S > 0$ . Se a entropia permanecer constante no processo ( $\Delta S = 0$ ), este pode ser revertido sem violar a segunda lei. Muito naturalmente, processos como esse são ditos reversíveis (MOURA,2016 p.14).

## 4.5 Definição Termodinâmica da Temperatura

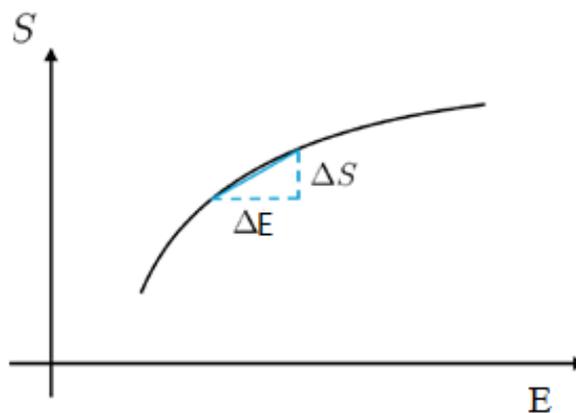
A alta temperatura, uma mudança na energia provocará pequena mudança na entropia, por outro lado, essa mudança na entropia será maior a baixas temperaturas, isto é, a baixas temperaturas a mudança na entropia é grande quando a energia é alterada por uma pequena quantidade.

$$\frac{1}{T} = \frac{dS}{dE} \quad (4.25)$$

Podemos ver que a mudança na entropia está inversamente relacionada à temperatura.

A condição que caracteriza o equilíbrio termodinâmico é que a variação da entropia em relação à energia seja constante e igual ao inverso da temperatura absoluta, Em outras palavras, o inverso da temperatura é dado pela inclinação de um gráfico de energia versus entropia. Dessa expressão a ideia de temperatura negativa não parece tão louca, significa apenas que o sistema irá aumentar sua entropia cedendo energia interna,  $S = S(U)$ . Uma relação típica entre a entropia e a energia está ilustrada no gráfico da figura 4.4.

**Figura 4.4:** Gráfico típico da entropia (S) em função da energia interna (U) de um sistema termodinâmico. A temperatura T é dada pela inclinação da curva:  $1/T = \Delta S/\Delta E$ .



Fonte: Elaborado pelo autor

## 4.5 Temperatura Absoluta Negativa

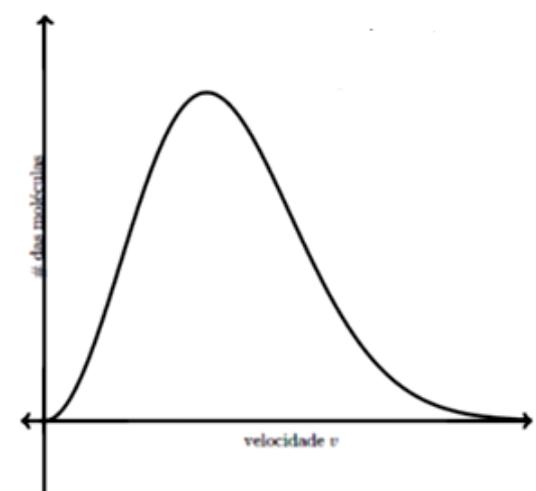
O significado físico da temperatura de um gás é determinado pelo movimento caótico de suas partículas, dessa forma, quanto mais frio o gás, mais lentas as partículas estarão. Toda a desordem desaparece a zero Kelvin. As partículas param de se mover

(sistemas clássicos) e, portanto, nada pode ser mais frio que o zero absoluto na escala Kelvin.

Se a temperatura absoluta for interpretada como a energia cinética média do sistema, não existem temperaturas negativas. Estas só não são paradoxais definindo de forma mais rigorosa a temperatura como uma relação entre a energia e a entropia.

Do cotidiano, sabemos que para ferver a água você precisa de energia. À medida que a água é aquecida, as moléculas aumentam sua energia cinética e se movem, em média, cada vez mais rápido. Ainda assim, moléculas isoladas têm diferentes energias cinéticas, de muito lentas a muito rápidas. Os estados de baixa energia são mais prováveis do que os estados de alta energia, ou seja, apenas algumas partículas se movem muito rápido. Em física, a distribuição é conhecida como distribuição de Boltzmann. A distribuição de Maxweel-Boltzmann mostra como as velocidades das moléculas são distribuídas em um gás ideal e, geralmente, é representada pelo gráfico abaixo:

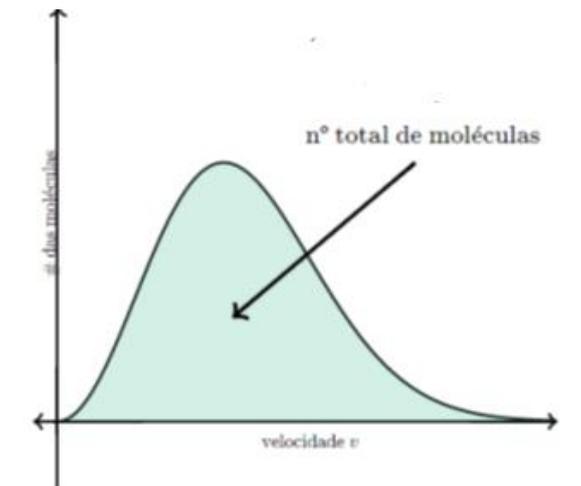
**Figura 4.5:** Distribuição de Maxweel-Boltzmann



**Fonte:** Adaptado de <https://pt.khanacademy.org/science/physics/thermodynamics/temp-kinetic-theory-ideal-gas-law/a/what-is-the-maxwell-boltzmann-distribution>

Vemos que o gráfico não é simétrico, há uma “cauda” mais longa na extremidade direita do gráfico que é a região de altas velocidades. O eixo y do gráfico fornece o número de moléculas por unidade de velocidade. A área total sob a curva é igual ao número total de molécula do gás.

**Figura 4.6:** Número total de molécula do gás



**Fonte:** Adaptado de <https://pt.khanacademy.org/science/physics/thermodynamics/temp-kinetic-theory-ideal-gas-law/a/what-is-the-maxwell-boltzmann-distribution>

Pode-se ter um sistema físico em que essa distribuição é completamente inversa: muitas partículas têm altas energias e apenas algumas têm baixas energias. Esta inversão da distribuição de energia significa que as partículas assumiram uma temperatura absoluta negativa.

A distribuição de Boltzmann invertida é a marca registrada da temperatura absoluta negativa, embora o sistema não seja mais frio que zero Kelvin, mas mais quente, como afirma Schneider:

É ainda mais quente que qualquer outra temperatura positiva a escala de temperatura não termina simplesmente no infinito, mas, em vez disso, salta a valores negativos. Uma temperatura negativa só pode ser alcançada com um limite superior de energia. (SCHNEIDER, BRAUN *et al.*, 2013).

O significado de uma temperatura absoluta negativa pode ser melhor ilustrado por esferas rolando em uma paisagem montanhosa, onde os vales atuam como baixas energias potenciais e os picos como altas energias. Quanto mais rápido as esferas se movem, maior sua energia cinética: se você começar com temperaturas positivas e aumentar a energia total das esferas aquecendo-as, as esferas se espalharão cada vez mais em regiões de alta energia. Se fosse possível aquecer as esferas a uma temperatura infinita, haveria uma chance igual de encontrá-las em qualquer lugar da paisagem, independentemente da energia potencial. Se agora você pudesse adicionar ainda mais energia e, assim, aquecer ainda mais as esferas, elas se reuniriam preferencialmente em estados de alta energia e seriam mais quentes que a temperatura infinita. A distribuição

de Boltzmann seria invertida e, portanto, teríamos uma temperatura negativa.( BRAUN at al, 2013)

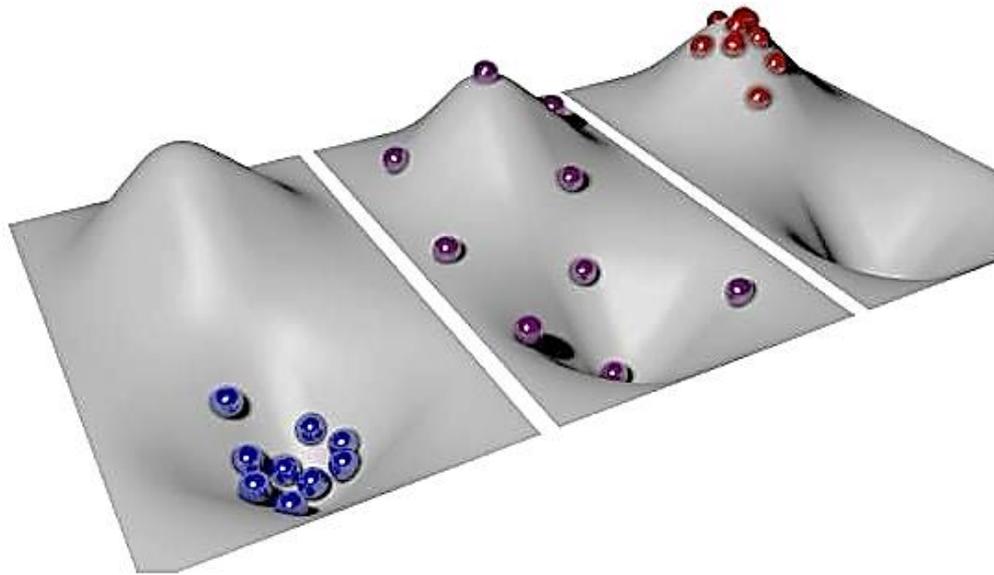
A primeira impressão é que parece estranho que uma temperatura absoluta negativa seja mais quente que uma positiva, porém, isso é simplesmente uma consequência de uma definição histórica de temperatura absoluta, se fosse definida de outra forma, essa aparente contradição não existiria.

Essa inversão da população de estados de energia não é possível na água, nem em nenhum outro sistema natural, pois o sistema teria que absorver uma quantidade infinita de energia, o que é impossível. No entanto, se as partículas possuísem um limite superior de energia, como o topo da colina na paisagem de energia potencial, a situação seria completamente diferente.

A matéria em temperaturas absolutas negativas tem toda uma gama de consequências surpreendentes: com sua ajuda, motores térmicos, como motores de combustão, podem ser criados com eficiência de mais de 100%. Isso não implica, no entanto, que a lei da conservação da energia seja violada. Em vez disso, o motor poderia não apenas absorver energia do meio mais quente e, portanto, trabalhar, mas, ao contrário do caso normal, também poderia fazê-lo de um meio mais “frio”.

Em temperaturas puramente positivas, o meio mais frio inevitavelmente aquece, absorvendo assim parte da energia do meio mais quente e, assim, limitando a eficiência. Se o meio quente tiver uma temperatura negativa, é possível absorver energia de ambos os meios simultaneamente. O trabalho realizado pelos motores é, portanto, maior do que a energia retirada apenas do meio quente e a eficiência permanece acima de 100%.

**Figura 4.7** – O experimento pode ser comparado a esferas em uma superfície ondulada.

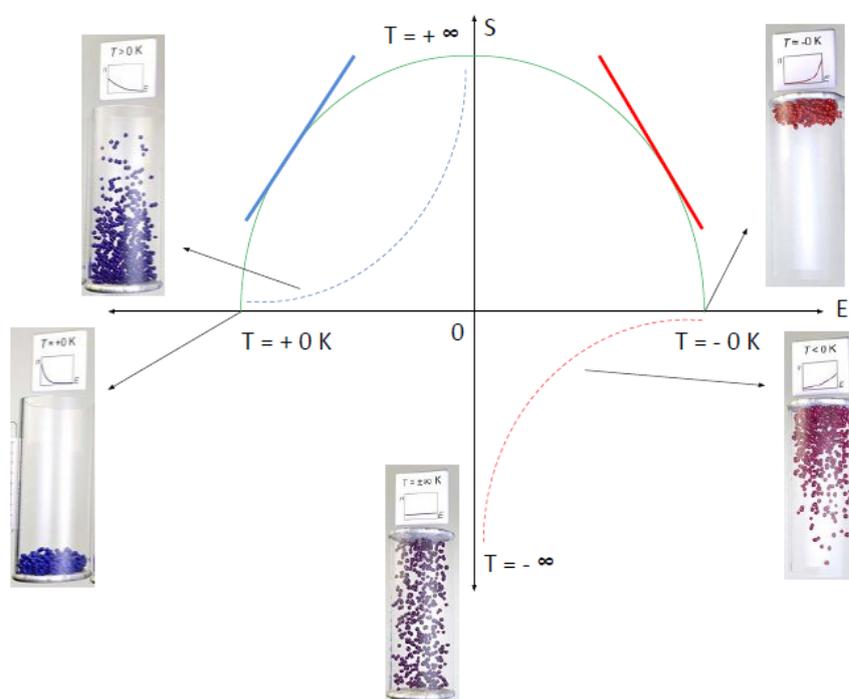


Fonte: <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=temperatura-abaixo-zero-absoluto&id=010170130107#.YI9B2YbMK1s>

Nas temperaturas positivas (à esquerda da figura 4.5) a maioria das esferas fica nos vales, em seu estado de energia mínimo, quase imóveis - uma distribuição de Boltzmann normal. Em uma temperatura infinita (centro), as esferas se distribuem uniformemente nos dois estados. Na temperatura absoluta negativa (direita), entretanto, a maioria das esferas vai para os picos, no limite superior de energia potencial (e cinética). Os estados com energia total mais elevada ocorrem mais frequentemente - uma distribuição de Boltzmann invertida.

Para conseguir a inversão de população (figura 4.8) tem que conduzir um sistema a um estado de não equilíbrio, o que corresponde a uma temperatura negativa. A inversão de população é impossível de ocorrer em sistemas em equilíbrio térmico.

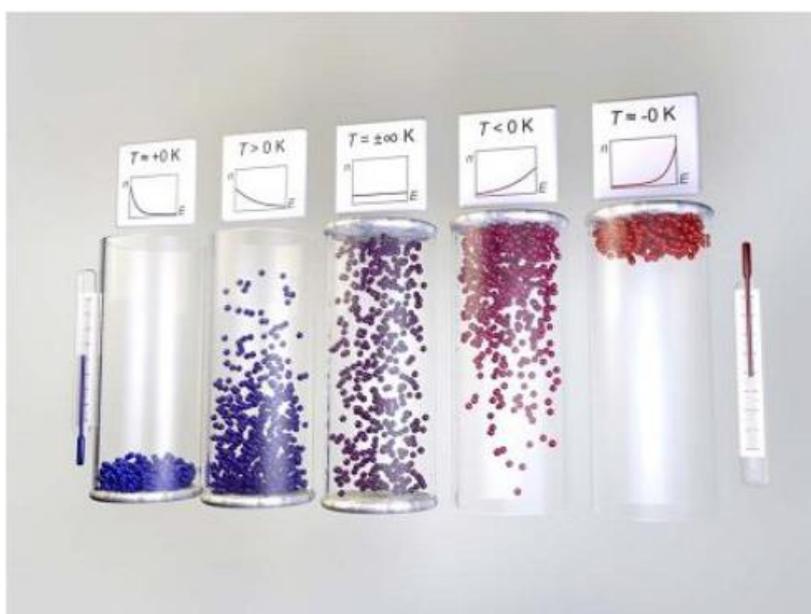
**Figura 4.8-** Gráfico da Entropia x Energia



**Fonte:** <https://questcosmic.wordpress.com/2016/08/12/uma-termodinamica-quantica-antes-que-o-inferno-congele/>

O sistema da figura 4.9 contém um gás quântico, desde o estado inicial até à inversão de população. Podemos definir um gás quântico no qual as partículas atuam como se fossem uma só, sendo impossível distinguir umas das outras.

**Figura 4.9-** População invertida



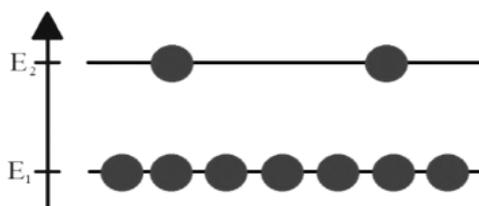
**Fonte:** <https://questcosmic.wordpress.com/2016/08/12/uma-termodinamica-quantica-antes-que-o-inferno-congele/>

Desta forma para um sistema em que a entropia é função da energia, a temperatura é positiva quando a entropia for uma função crescente, e será negativa quando a entropia for uma função decrescente.

A temperatura negativa é um fenômeno que ocorre apenas em sistemas quânticos, e por consequência o teorema da equipartição não é válido nesse limite. Na Termodinâmica Clássica, onde o teorema é válido, sempre que aumentamos a energia, a entropia tende a aumentar. Dessa forma, sempre teremos uma temperatura positiva. Podemos obter uma temperatura negativa através de inversão de população entre níveis de energia de um sistema limitado superiormente e inferiormente, o que não é possível em sistemas macroscópicos.

Para compreender a inversão de população, consideramos um grupo de  $N$  átomos que podem estar em dois estados um estado fundamental com energia  $E_1$  e o estado excitado com energia  $E_2$  ( $E_2 > E_1$ ).

**Figura 4.10** – sistema de energia de um sistema limitado superior e inferiormente



**Fonte:** <https://www.youtube.com/watch?v=5gjeIkBlpKI>

Sendo  $N_1$ , o número de átomos no estado fundamental e  $N_2$  o número de átomos no estado excitado. Para descrever a distribuição de partículas com átomos ou moléculas sob o estado de energia acessíveis a elas, devemos utilizar uma distribuição estatística chamada distribuição de Boltzmann, essa distribuição nos fornece a probabilidade de que um sistema esteja em um determinado estado em função da sua energia e da sua temperatura. A partir dessa distribuição, obter a razão da quantidade de partículas de átomos, como sendo a exponencial negativa da variação da energia pelo

produto pelo produto da constante de Boltzmann e temperatura. Sendo  $\Delta E$  a diferença de energia entre os dois estados.

$$N_1/N_2 = e^{-\Delta E/KT} \quad (4.26)$$

$$\Delta E = hf \quad (4.27)$$

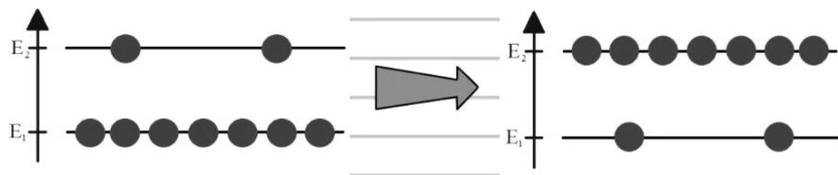
Onde  $h$  é a constante de Planck e  $f$  a frequência da luz emitida ou absorvida pelo átomo quando ele passa de um estado para o outro. Considerando a temperatura ambiente  $T \approx 300$  K e a frequência da luz na região do visível  $f \approx 5 \times 10^{14}$  a razão entre  $N_1$  e  $N_2 \ll 1$ , assim no equilíbrio termodinâmico, o estado mais populoso corresponde ao estado fundamental. Quando aumentamos a temperatura do sistema também aumentamos o número de átomos no estado excitado ( $N_2$ ), porém  $N_1$  será maior que  $N_2$  no equilíbrio térmico. No limite da temperatura tender para o infinito,  $N_1 = N_2 = N/2$ .

A inversão de população consiste em inverter o número de átomos no estado  $E_1$  e  $E_2$  de maneira que o número de átomos no estado excitado ( $N_2$ ) seja maior que o número de átomos no estado fundamental  $N_1$ . Esse processo é impossível de ocorrer em sistemas em equilíbrio térmico. Nesse caso:

$$\frac{dS}{dU} > 0 \quad (4.28)$$

$$T > 0 \quad (4.29)$$

**Figura 4.10** – inversão de população



**Fonte:** <https://www.youtube.com/watch?v=5gjeIkBlpKI>

Logo, para conseguir a inversão de população, precisamos conduzir o sistema a um estado de não equilíbrio ou seja:

$$\frac{dS}{dU} < 0 \quad (4.30)$$

$$T < 0 \quad (4.31)$$

Quando a temperatura é definida em termos de energia e entropia, uma temperatura absoluta negativa é mais quente do que a maior temperatura absoluta positiva, este fato nos leva a reescrever o enunciado de Kelvin-Planck, pois nessa situação podemos ter um reservatório com temperatura absoluta positiva e um reservatório com temperatura absoluta negativa.

O enunciado de Clausius para  $T < 0$  continua válido, isto é, "É impossível para qualquer sistema operar de maneira que o único resultado seja a transferência de energia sob a forma de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente."

Enunciado de Kelvin-Planck (modificado): "É impossível a construção de uma máquina que opere em um ciclo fechado cujo único efeito seja: a) a extração de calor de um reservatório à temperatura absoluta positiva, com a conversão de todo esse calor em trabalho; b) rejeitar calor em um reservatório a  $t < 0$  com o trabalho correspondente realizado pelo motor.

No zero absoluto ou quando  $T = 0$  K, toda energia de movimento térmico foi removida e todos os átomos ou íons em uma rede cristalina perfeita estão em uma rede contínua perfeita, sem desordem espacial, sem movimento térmico, entropia zero. Se  $S = 0$  somente há uma maneira de arranjar as moléculas. Na realidade não se pode atingir o zero absoluto, tudo tem alguma energia interna. A terceira lei da Termodinâmica é baseada nos trabalhos de Nernst e Planck que mesmo trabalhando independentemente no estudo da variação de entropia de certas reações químicas obtiveram os mesmos resultados.

Planck estabeleceu a terceira Lei: "Cada substância possui uma entropia finita e positiva, que se anula no zero absoluto, sempre que a substância pura assumir a estrutura cristalina de um cristal perfeito". Embora a terceira Lei não introduza nenhuma nova função termodinâmica, ela é de grande importância pois permite determinar a entropia absoluta por meio de medidas calorimétricas

A Terceira Lei da Termodinâmica também pode ser enunciada de outra forma: Não é possível, através de um número finito de operações, "reduzir" a  $T$  de qualquer

sistema com  $T > 0$  ao zero absoluto ou “aumentar” a  $T$  de qualquer sistema com  $T < 0$  ao zero absoluto.

## Capítulo 5

### Aplicação do Produto educacional

Nosso produto foi aplicado entre os dias 09 e 25 de maio de 2022, em uma turma do 2º ano do Ensino Médio do Instituto Federal de Pernambuco – Campus Barreiros, rede federal de ensino, localizado na Fazenda Sapé, zona rural de Barreiros-PE.

Nosso produto nasceu do diálogo entre a teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel, os mapas conceituais de Novak e a sequência didática proposta por Marco Antônio Moreira, Unidade de Ensino Potencialmente Significativa, que tem o intuito de estimular a pesquisa aplicada em educação e incentivar a prática do uso de teorias de aprendizagem que valorizem o protagonismo dos estudantes.

Como problematização inicial, entregar para os alunos uma folha com contendo a figura 5.1 abaixo:

Figura 5.1 – Problematização inicial



Figura 1: situação inicial sobre o conceito de entropia (disponível em: [www.facebook.com/cienciaememes/posts/617441232084214/](https://www.facebook.com/cienciaememes/posts/617441232084214/))

Fizemos os seguintes questionamentos, que foram respondidos pelos alunos:

- O que levou a criança a dar sempre a mesma resposta, embora as situações fossem diferentes?
- O que acontece quando as coisas estão desarrumadas?

Dando continuidade à aplicação do nosso produto, propusemos uma nova situação problema, em nível introdutório cujo objetivo foi levantar os conhecimentos prévios dos alunos. Antes de responderem ao questionamento, trabalhamos algumas

situações com os alunos, tais como: O que acontece com as moléculas de uma substância quando ela está no estado sólido, como também, o que acontece quando elas estão no estado líquido, e definimos do ponto de vista Termodinâmico.

Em seguida responderam, em uma folha de papel, a partir da observação da figura abaixo, os seguintes questionamentos:

- a) O que aconteceu com as moléculas de água ao passar do estado sólido para o estado líquido?
- b) Houve realização de trabalho?

**Figura 5.2** – Situação-problema



**Fonte:** Fonte: disponível em <http://tiobill.com.br/derretendo-o-gelo/>

A partir das respostas desses questionamentos, pudemos analisar os conhecimentos prévios dos alunos, e a partir dessas observações, preparamos, dentro da UEPS, situações para ampliar e consolidar os conhecimentos dos alunos a respeito da entropia e suas implicações.

As respostas foram dadas dentro do esperando, para que déssemos continuidade à aplicação do nosso produto. Abaixo apresentamos as respostas dos alunos, referentes aos dois questionamentos referentes à problematização inicial:

- |                          |   |
|--------------------------|---|
| Aluno 1: a) bagunça      | b) Fica difícil de se achar alguma coisa; |
| Aluno 2: a) desarrumação | b) fica bagunçada;                        |
| Aluno 3: a) entropia     | b) menor organização                      |
| Aluno 4: a) bagunça      | b) tudo misturado;                        |

Aluno 5: a) sempre bagunçado	b) dá trabalho pra arrumar;
Aluno 6: a) bagunça	b) não se pode andar no quarto;
Aluno 7: a) bagunça	b) difícil de arrumar;
Aluno 8: a) tudo fora de ordem	b) não achamos nada que procuramos;
Aluno 9: a) bagunça	b) difícil achar alguma coisa;
Aluno 10: a) bagunça	b) quando procuramos, não achamos nada;
Aluno 11: a) bagunça	b) não queremos arrumar;
Aluno 12: a) bagunça	b) uma por cima da outra;
Aluno 13: a) situações parecidas	b) tem entropia;
Aluno 14: a) entropia	b) entropia;
Aluno 15: a) bagunça	b) desordem;

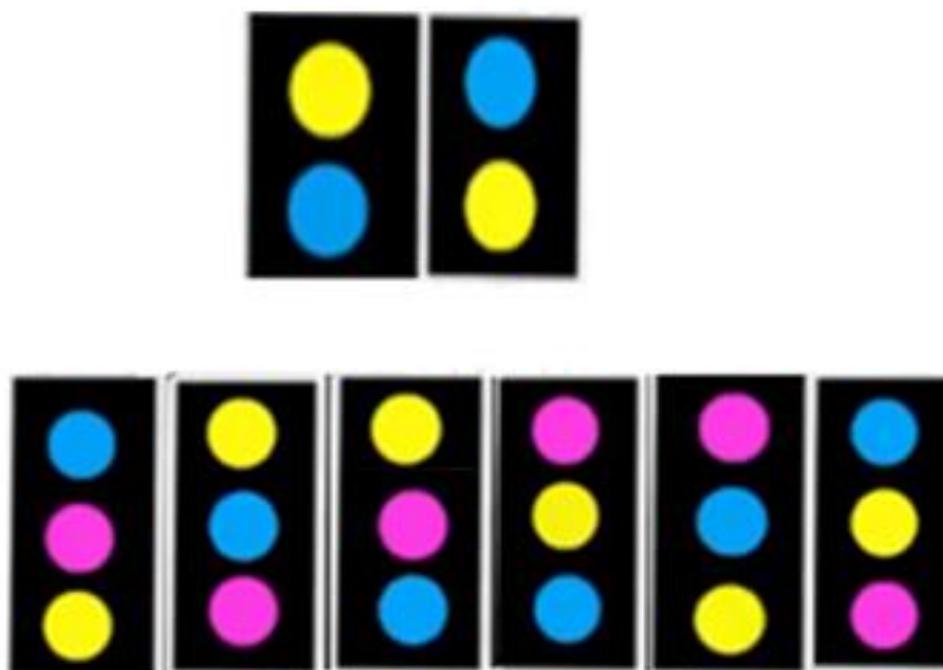
As repostas para o segundo questionamento, foram:

Aluno 1: a) ficaram mais livres	b) não
Aluno 2: a) se espalharam	b) não
Aluno 3: a) se espalharam	b) não
Aluno 4: a) se espalharam	b) não
Aluno 5: a) transformou-se em água	b) não
Aluno 6: a) aumentou a desordem	b) não
Aluno 7: a) aumentou a desordem	b) não
Aluno 8: a) se espalharam	b) não
Aluno 9: a) mais soltas	b) não
Aluno 10: a) aumentou a desordem	b) não
Aluno 11: a) aumentou a desordem	b) não
Aluno 12: a) aumentou a desordem	b) não
Aluno 13: a) se espalharam	b) não
Aluno 14: a) aumentou a desordem	b) não
Aluno 15: a) aumentou a desordem	b) não

Através do diálogo, partindo do que foi observado no caso da mudança de estado (Sólido para líquido) e de outros exemplos do cotidiano, introduzimos o conceito de Entropia, para que os alunos consigam entender que o sistema recebeu energia, mas não houve realização de trabalho.

. A partir da apresentação da figura 11 abaixo, perguntamos ao aluno quantos estados o sistema pode assumir na primeira situação e na segunda situação, mostrando que quando eu aumento meu sistema, aumento o número de combinação (estados possíveis do sistema). Quanto maior o número de estados possíveis, menos energia estará disponível para ser utilizada.

**Figura 5.2 - Estados possíveis**



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Introduzimos, então, o conceito termodinâmico da temperatura, a partir da 1ª Lei, chegamos a  $\Delta S = Q/T$ : A definição termodinâmica diz que alteração na entropia é igual ao calor adicionado ao sistema dividido pela temperatura na qual o calor é adicionado.

Se houver pequena alteração na temperatura e é o que acontece, podemos ver isso com a definição matemática, estatística ou combinatória da entropia onde  $\Omega$  é o número de estados que o sistema poderá suportar, este é o caso no qual todos os estados são igualmente prováveis, o que é uma situação bastante consistente,  $S = k \ln \Omega$ .

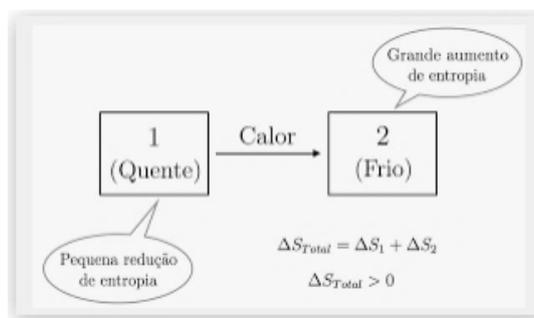
A partir do conceito de entropia, introduzimos a 2ª lei da Termodinâmica.

$$\Delta S_u = \geq 0$$

A alteração na entropia do universo quando qualquer processo está em andamento. Isso nos diz que, quando qualquer coisa acontece no universo, o efeito líquido é que há mais entropia no universo em si.

Mostramos como num processo de transferência de calor, a entropia do universo aumenta.

**Figura 5.3** – Processo de transferência de calor



**Fonte:** Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Marcos Moura, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

$$\Delta S_U = \Delta S_1 + \Delta S_2 \quad (5.1)$$

$$\Delta S_U = -\frac{Q}{T_1} + \frac{Q}{T_2} \quad (5.2)$$

$$\Delta S_U = \frac{Q}{T_2} - \frac{Q}{T_1} \quad (5.3)$$

Assim, o sistema perde calor a uma temperatura  $T_1 > T_2$ . O calor será transferido do corpo quente para o corpo frio

Mostramos para aos alunos, que a definição de temperatura como a energia cinética média das moléculas, pode levar a um paradoxo quando experimentos demonstram temperatura absolutas menores que zero.

Depois que trabalharmos as condições iniciais, aprofundamos o conhecimento, fazendo questionamentos para os alunos, levamos em conta a diferenciação progressiva, começando com aspectos mais gerais:

a) O que são processos reversíveis? O que são processos irreversíveis. Logo em seguida, fizemos a leitura de dois textos:

- Leitura e discussão do texto Entropia e 2ª Lei e transformações reversíveis e irreversíveis, disponíveis em <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/entropia-segunda-lei>.  
[e https://brasilecola.uol.com.br/fisica/transformacoes-reversiveis-irreversiveis.htm](https://brasilecola.uol.com.br/fisica/transformacoes-reversiveis-irreversiveis.htm), respectivamente. Abaixo foto do momento de leitura e discussão do texto.



Em continuidade, retomamos os aspectos mais gerais estruturantes, com novas situações-problema. Dessa forma, introduzimos o conceito de que a mudança na entropia está inversamente relacionada à temperatura, ou seja, em termos de equação

$$\frac{1}{t} = \frac{dS}{dE} \quad (5.4)$$

Podemos a partir de agora, aprofundar o conhecimento e construímos o gráfico  $S = f(U)$ . Introduzimos a segunda lei da termodinâmica, explicando qual a sua relação com Entropia: Enunciado de Clausius e enunciado de Kelvin-Planck. Enunciamos também a segunda lei da termodinâmica formulada em termos quantitativos usando o conceito de entropia, o qual fornece uma estimativa da desordem do sistema. E vimos qual a relação entre entropia e temperatura absoluta negativa. Construímos um mapa conceitual.

Retomando as características mais relevantes do conteúdo trabalhados, através do diálogo e da apresentação de algumas situações, explicar as diferenças entre temperaturas absolutas positivas e temperaturas absolutas negativas, definindo temperatura do ponto de vista de entropia e energia. Vimos que essa abordagem da temperatura exige uma reformulação do enunciado de Kelvin-Planck. Sendo assim, enunciamos a 2ª lei da Termodinâmica reformulada. Em seguida construímos um mapa conceitual que envolve os conceitos de temperaturas absolutas positivas, bem com temperaturas absolutas negativas.

Dando continuidade à aplicação do nosso produto propusemos uma avaliação que consistiu em uma prova de conhecimentos com questões sobre os temas abordados. A avaliação abaixo foi aplicada a grupos de três alunos.

a) a entropia de uma batata assada quente diminui à medida que ela esfria. Isso viola o princípio do aumento de entropia? Explique.

b) na questão a, o que sistema e o que o meio? O que forma o sistema mais o meio?

c) por que não se pode construir uma máquina com 100% de rendimento? Que grandeza física está relacionada ao fato de não se poder construir uma máquina com 100% de rendimento

d) No caso de temperaturas absolutas negativas, elas são mais frias ou mais quentes que o zero absoluto? Como isso é possível?

e) É possível, através de um número finito de operações, “reduzir” a T de qualquer sistema com  $T > 0$  ao zero absoluto?

f) Construção do mapa conceitual final.

### **8º Passo – Avaliação da UEPS**

-A UEPS somente foi considerada exitosa pois a avaliação do desempenho dos alunos forneceu evidências de aprendizagem significativas.

## Capítulo 6

### Resultados e discussões

Neste capítulo, apresentamos os dados coletados durante a aplicação da UEPS com base na observação do desenvolvimento da aplicação do produto, no resultado da avaliação dos questionamentos feitos e depoimentos dos alunos. Os mesmos foram analisados, com base na teoria da aprendizagem significativa, que valida este estudo e que teve como objetivo **“promover a Aprendizagem Significativa por meio de uma UEPS que abordou a aprendizagem dos conceitos de entropia e segunda lei da termodinâmica”**.

Relembramos, aqui, que a UEPS foi desenvolvida no Instituto Federal de Pernambuco – campus Barreiros, em duas turmas do 2º ano do Ensino Médio integrado, do turno da manhã, com 18 estudantes. A aplicação foi realizada em quatro momentos, que ocuparam oito períodos de aula (duas horas-aula em cada momento), no mês de maio de 2022.

O Quadro abaixo mostra a síntese de cada um das fases da sequência, durante a execução da UEPS, a data em que ocorreram, bem como a relação com os passos da UEPS.

Quadro 01 – Descrição dos momentos da UEPS

<b>Data</b>	<b>Momento</b>	<b>Passo na UEPS</b>
10/05/22	-Apresentação das situações-problema: Observação de imagens, situações-problemas em nível introdutório.	2º Passo – Criar/propor situações que levem o aluno a externalizar seu conhecimento prévio.  - Materiais utilizados: Data show para mostrar as situações- problemas.  3º Passo: Criar situações-problema em nível introdutório que levem em conta o conhecimento prévio do aluno.
17/05/22	- Leitura e discussão de dois textos sobre entropia e 2ª lei;  - Introdução da 2ª lei da termodinâmica; enunciado de	4º Passo – uma vez trabalhadas as situações iniciais, aprofundar o conhecimento, levando-se em conta a diferenciação progressiva começando com aspectos mais gerais.  - Materiais utilizados: Textos impressos

	<p>Clausius e de Kelvin-Planck</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Entropia e temperatura absoluta negativa;</li> <li>- Construção de mapa conceitual</li> </ul>	<p>sobre entropia e segunda lei da Termodinâmica e transformações reversíveis e irreversíveis</p> <p>5º Passo – Retomar os aspectos mais gerais estruturantes, com novas situações-problema.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Materiais utilizados: Data show e quadro para confecção dos mapas conceituais.</li> </ul>
24/05/22	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Explicando as diferenças entre temperaturas absolutas positivas e temperaturas absolutas negativas, definindo temperatura do ponto de vista de entropia e energia.</li> <li>-- Reformulação do enunciado de Kelvin-Planck</li> <li>- 2ª lei da Termodinâmica reformulada</li> <li>- Construção de um mapa conceitual que envolva os conceitos de temperaturas absolutas positivas, bem com temperaturas absolutas negativas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materiais utilizados: Data show e quadro para exposição do conteúdo.</li> </ul> <p>6º passo - Diferenciação progressiva retomando as características mais relevantes do conteúdo em questão, porém de uma perspectiva integradora.</p>
31/05/22	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prova de conhecimentos, com questões sobre temas abordados.</li> </ul>	<p>7º Passo – A avaliação da aprendizagem da UEPS</p>

Mediante coletas apresentadas, tanto dos questionários, quanto da construção do mapa conceitual, mostramos na tabela abaixo, uma análise quantitativa, representada pelos percentuais.

<b>Tabela 01: Categorias e médias percentuais em questionários e mapas conceituais (iniciais)</b>	
Respostas que tenham relação com a situação proposta	31,66%
Resposta que não tenham relação com a situação proposta	68,34%

<b>Tabela 02: Categorias e médias percentuais em questionários e mapas conceituais (finais)</b>	
Aprendizagem dos conceitos	59,32%
Erros e sem resposta	40,68%

Abaixo, respostas do questionário final e construção do mapa conceitual final.

## Respostas do questionário final.



Curso: Técnico em Agropecuária  
Disciplina: Física  
Prof. José Adauto Costa

Aluno(a):

Turma 2º e

Gláucia de Azevedo  
Mário Pereira  
Jose Wilton

### Atividade Avaliativa 2

- a) a entropia de uma batata assada quente diminui à medida que ela esfria. Isso viola o princípio do aumento de entropia? Explique.
- b) no caso da batata, o que sistema e o que o meio? O que forma o sistema mais o meio?
- c) Por que não se pode construir uma máquina com 100% de rendimento? Que grandeza física está relacionada ao fato de não se poder construir uma máquina com 100% de rendimento
- d) No caso de temperaturas absolutas negativas, elas são mais frias ou mais quentes que o zero absoluto? Como isso é possível?
- e) É possível, através de um número finito de operações, "reduzir" a T de qualquer sistema com  $T > 0$  ao zero absoluto?
- f) Construa um mapa conceitual que relacione entropia à 2ª Lei da Termodinâmica (atividade já em andamento).

a) Não, pois vai diminuir a entropia do sistema, não do universo.

b) Sistema = batata, meio = todo que está fora do sistema.

c) Por que o rendimento não 100%, a fonte fria tem que ter ~~uma~~ uma temperatura maior que zero.

d) Mais quente, pois a entropia do sistema quente é menor mas tem energia extra se torna quente.

e) É impossível para qualquer procedimento, levar a temperatura à  $T=0K$  em um número finito de operações.

Atividade Avaliativa 2

a) a entropia de uma batata assada quente diminui à medida que ela esfria. Isso viola o princípio do aumento de entropia? Explique.

b) no caso da batata, o que sistema e o que o meio? O que forma o sistema mais o meio?

c) Por que não se pode construir uma máquina com 100% de rendimento? Que grandeza física está relacionada ao fato de não se poder construir uma máquina com 100% de rendimento

d) No caso de temperaturas absolutas negativas, elas são mais frias ou mais quentes que o zero absoluto? Como isso é possível?

e) É possível, através de um número finito de operações, "reduzir" a T de

A- Não. O sistema - que é representado pela batata - possui um nível próprio ~~de~~ de entropia, porém a entropia é uma constante que apenas aumenta no universo.  $\Delta S \geq 0$

↓  
Variação de Entropia

B-

A Batata é o sistema e ambiente externo é o meio e a soma de ambi-  
ente + sistema é igual ao universo.

C- Não é possível porque sempre haverá uma perda de calor da ~~fonte~~ fonte quente para a fonte fria, resultante do contato da máquina com fatores como tempo e ambiente. Entropia.

D- mais quente porque não é uma função contínua.

E- Não.

$\Delta S = \text{VARIAÇÃO de entropia}$

$\Delta S = \frac{Q}{T}$

Q = QUANTIDADE de calor  
T = TEMPERATURA ABSOLUTA

### Entropia

Representado por S

Não é algo físico  
é a quantidade usada para definir o nível de desordem de um sistema

Quanto maior a organização, menor a entropia

Divide-se em processos

Reversível

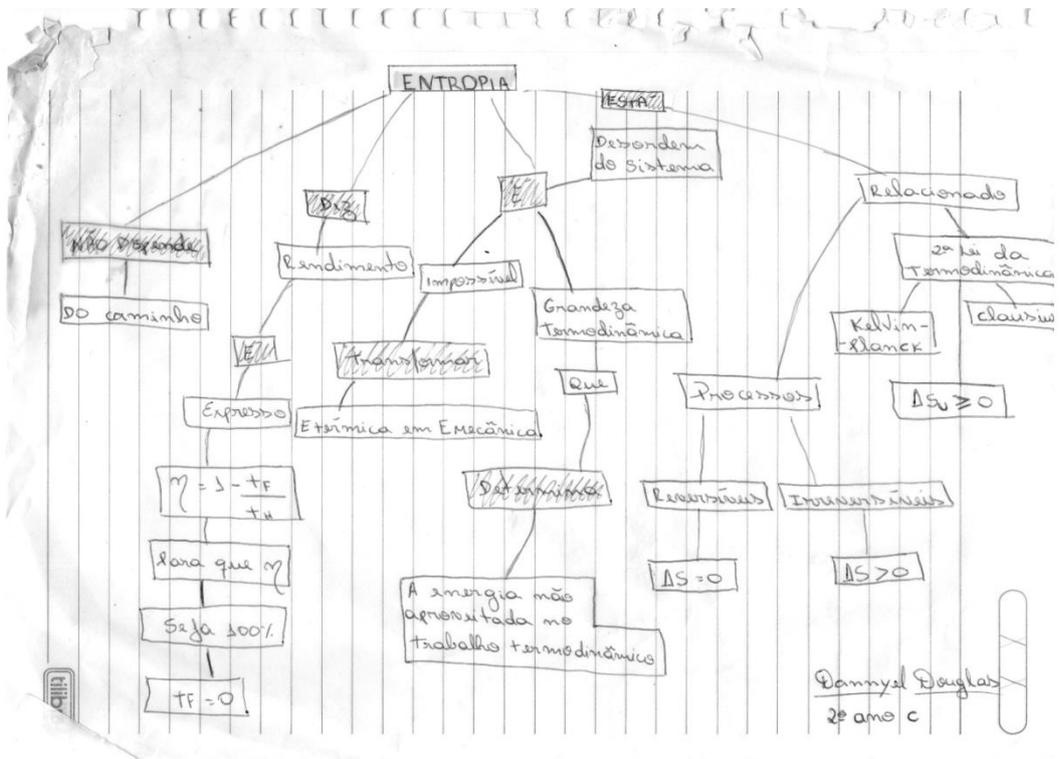
Sistema pode voltar ao estágio inicial  
Ex: Estovar milho de pipoca  
Ex: Processos da Natureza

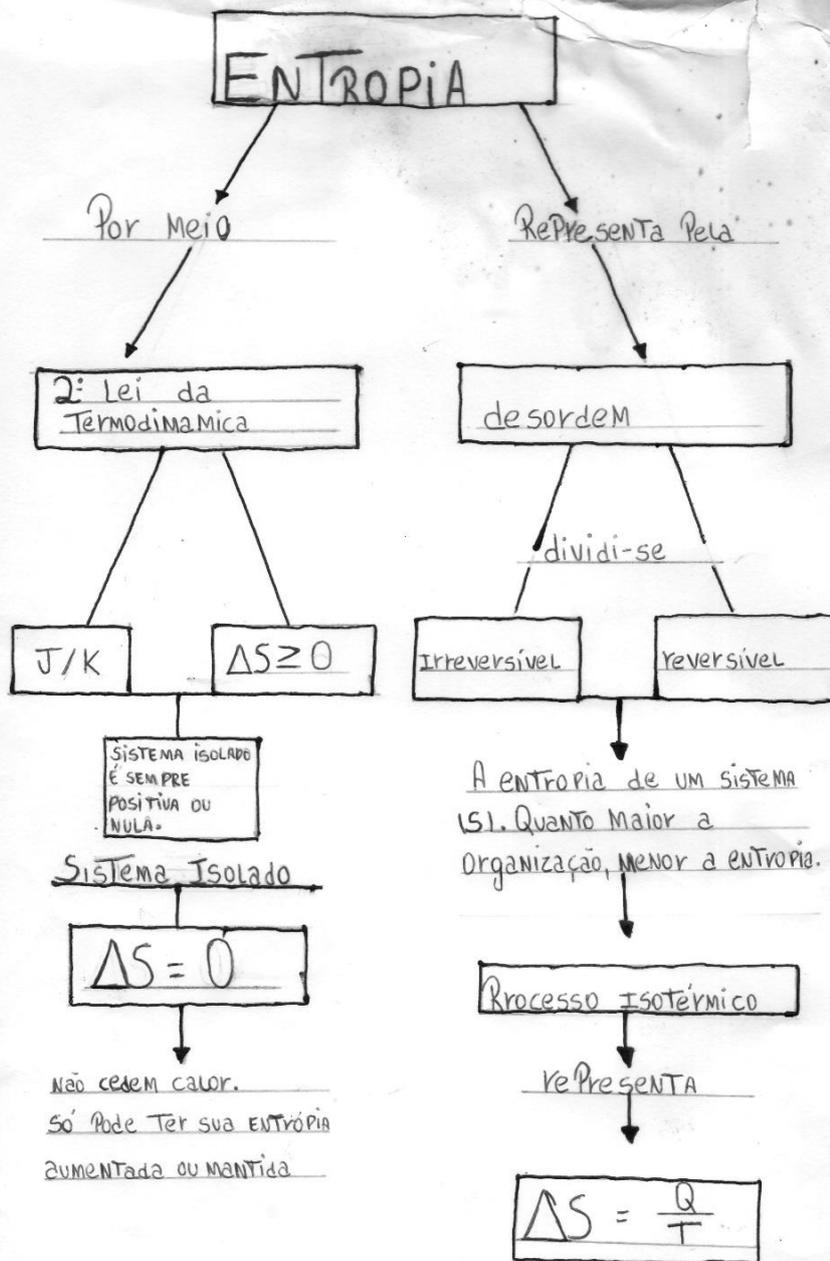
Irreversível

Sistema em situação não pode voltar espontaneamente ao estágio inicial.  
Ex: Queimar um alimento  
Cera de vela pode derreter, vice-versa

\* Professor eu troquei os exemplos desculpe

William Ragner 2º C





Maria Vitória da Silva 2ºB

-A UEPS somente será considerada exitosa se a avaliação do desempenho dos alunos fornecer evidências de aprendizagem significativas, para isso será feita uma análise quantitativa e qualitativa sobre as atividades realizadas no desenvolvimento da UEPS, verificando se ocorreu uma aprendizagem significativa.

No dia 17/05/22, 4º Passo da UEPS, foi mostrado aos alunos o que é um mapa conceitual e como construí-lo. Demos como exemplo o mapa sobre entropia e relação com a 2ª lei da termodinâmica para que entendessem como se dá o processo de construção e a importância dessa ferramenta na organização determinados conteúdos, o que impacta na estrutura cognitiva, permitindo, ao professor, compreender como os alunos organizam a rede de conteúdos de habilidades trabalhados. Posteriormente, no dia 24/05/2022, 6º passo da UEPS, foi proposto para os grupos, como tarefa para casa, a construção de mapas conceituais sobre entropia e segunda lei da termodinâmica como ferramenta avaliativa, percebemos que os mapas melhoraram consideravelmente em relação ao primeiro, alinhado com o que foi proposto. Alguns grupos inseriram vários outros elementos que não foram abordados nas aulas, como, por exemplo, rendimento de uma máquina térmica e sua relação com a entropia, bem como, entropia como função de estado.

Com base nas observações da aplicação do produto e depoimento dos alunos, percebemos o interesse na execução das atividades por meio de uma sequência didática, a temática ficou mais organizada metodologicamente, bem como percebi uma melhora de interação entre o professor e os alunos, tornando-se para a minha prática uma estratégia de suma importância. Ficou evidenciada a satisfação dos alunos ao término, algo que me chamou bastante a atenção e necessidade de fazer com uma maior frequência essas aulas. Os resultados da aplicação do produto foram muito satisfatórios, onde começamos com uma problematização inicial a partir da observação de imagens relacionadas à desorganização, como visto no capítulo 5.

Tivemos uma fase inicial de dificuldades, especificamente na construção do primeiro mapa conceitual, principalmente em como ligar um conceito solto à questão focal, isto foi resolvido criando um estacionamento de conceitos (vários conceitos ligados à questão focal, no caso entropia). Esses conceitos são ligados por um termo de ligação que explica qual a relação entre os conceitos inicial e final. Para o aluno que estivesse interessado no aprofundamento indiquei o software CmapsTools, disponível em <https://cmap.ihmc.us/>. Este software é destinado à construção de mapas conceituais.

Os resultados foram animadores, diante do primeiro mapa realizado por esses alunos. Chegamos à conclusão que os mapas conceituais pode ser uma incrível ferramenta construção do conhecimento, para consolidação do saber científico.

## **Capítulo 7**

### **Conclusões e Perspectivas**

Com bases no acompanhamento e em todos os dados da aplicação desse produto, percebemos que houve aprendizagem significativa, que foi muito além de decorar fórmulas. Percebemos protagonismo e reflexão em torno do que estavam estudando. Em relação à ao estudo da entropia, por exemplo, segundo relatos de alguns dos alunos, permitiu, ainda, que desenvolvessem outro olhar a respeito da natureza da ciência, principalmente quando conceituamos a relação entre entropia e temperatura negativa. Dessa forma, possibilitamos ao aluno a liberdade necessária para crescerem conceitualmente, procedimentalmente e epistemologicamente.

Por meio destes pequenos, mas consistentes passos, podemos contribuir para que nossos alunos entendam melhor os conceitos científicos com vistas ao letramento científico.

## Referências Bibliográficas

- MOREIRA, M. A. **Ensino e Aprendizagem Significativa**. 1ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2017.
- MOREIRA, M. A. **Teorias de Aprendizagem**. 2ed. São Paulo: EPU, 2011.
- PAUL A. TIPLER, RALPH A. LIEWELLYN. **Física Moderna**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CHANG, RAYMOND. **Físico-química: para ciências químicas e biológicas**. 1ed. São Paulo: McGraw-Hill.2008.
- SOUZA, GRAZIELA FERREIRA DE. **Mapas Conceituais: estratégias para ensinar e aprender significativamente**: 1 ed. Curitiba: CRV, 2021.
- VYGOTSKY, LEV SEMENOVICH. **Pensamento e linguagem**. 4 ed. São Paulo: Martins Fontes, 2008.
- COLEMAN, Bernard D. Conditions for Equilibrium at Negative Absolute Temperatures. **PHYSICAL REVIEW**, 1959. Disponível em: <https://www.ttps://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.115.262>. Acesso em. 12 de abril de 2022.
- H. M. NUSSENZVEIG. **Curso de Física Básica**. v.2. 4a ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2002.
- SALINA, SÍLVIO R.A. Introdução à Física Estatística. 2 ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo,2018.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, 2018.
- PCN – **Parâmetros curriculares nacionais: ensino médio**. Brasília: Ministério da Educação. Secretaria da Educação Média e Tecnológica, 2000.
- CUNHA, J. A. R.; SANTOS, O. P.; QUEIROZ, J. R. O. O ensino de entropia com enfoque da história da ciência. Atas do IX Encontro Nacional de Pesquisa em Educação e Ciências – IX ENPEC, Novembro de 2013. Disponível em:< <http://www.nutes.ufrj.br/abrapec/ixenpec/atas/resumos/R1522-1.pdf>>. Acesso em 04 mar.
- BORGES. E. P. **Irreversibilidade, desordem e incerteza**: Três visões da generalização do conceito de entropia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**: v. 21, n. 4, Dezembro de 1999.
- OLIVEIRA, M. J. de. **Termodinâmica**. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

AUSUBEL, DAVID. P. **Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva**. Lisboa: Plátano, 2003.

MOREIRA, MARCO ANTONIO; MASINI, ELCIE FORTES SALZANO. **Aprendizagem significativa**: a teoria de David Ausubel. São Paulo: Centauro, 2006.

MOREIRA, MARCO ANTONIO. MASINI. **Ensino e Aprendizagem significativa**:. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2017.

MOURA, Marcos. **Entropia estatística e o ensino da segunda lei da termodinâmica**.2016.197 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

MOURA, Marcos. Material instrucional associado à dissertação de mestrado **Entropia estatística e o ensino da segunda lei da termodinâmica**. 2016. 54f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

## **Apêndice A - O produto educacional**



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA  
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA  
(POLO 58 - UFRPE)

UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA:  
APRENDIZAGEM DOS CONCEITOS DE ENTROPIA E SEGUNDA  
LEI DA TERMODINÂMICA.

José Adauto dos Reis Costa

## Sumário

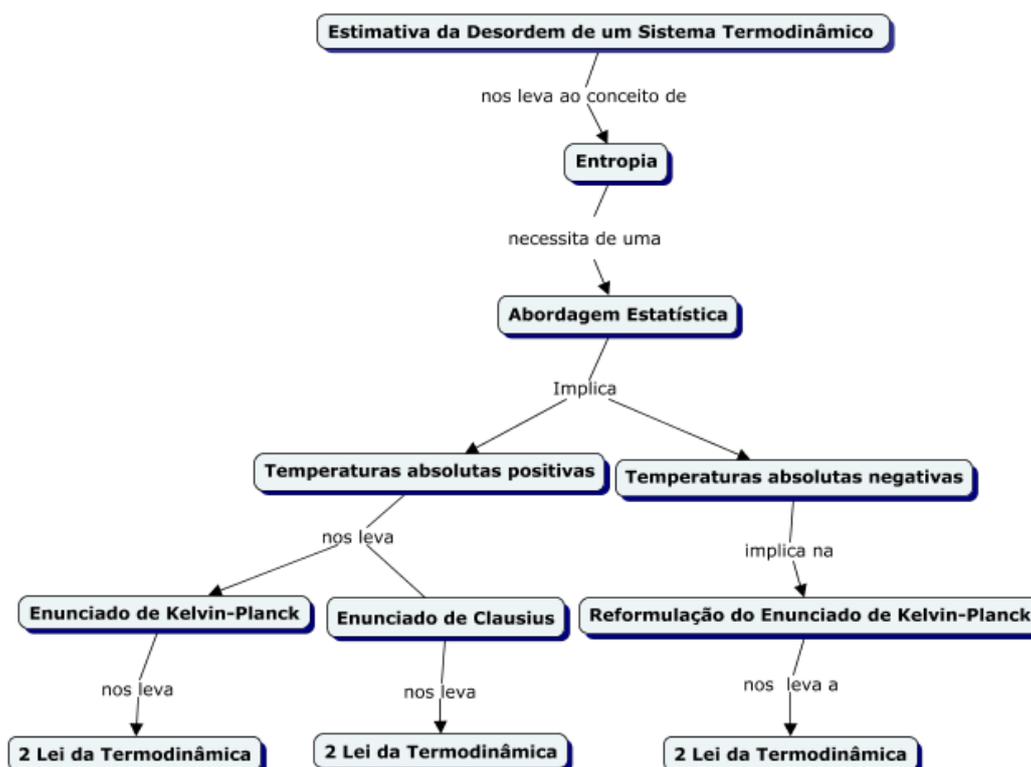
Apresentação	72
A sequência didática	73
Referências bibliográficas	80

## Apresentação

Nosso trabalho tem como enfoque principal a apresentação de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) que tem como objetivo, enquanto sequência de ensino, facilitar a ocorrência de aprendizagem significativa, na perspectiva de David Ausubel, dos conceitos de Física, especificamente alguns relacionados à Termodinâmica. As UEPS são constituídas por etapas que atuam como guias e auxiliam na sua elaboração. Através desta UEPS pretendemos contribuir para a melhoria do ensino, especificamente relativos aos conceitos de entropia, entropia e temperatura absoluta negativa, culminando com a reformulação da 2ª Lei da Termodinâmica, partindo da premissa de que só há ensino quando há aprendizagem e esta deve ser significativa; ensino é o meio, aprendizagem significativa é o fim.

O mapa conceitual abaixo, serve como referência para a construção das UEPS.

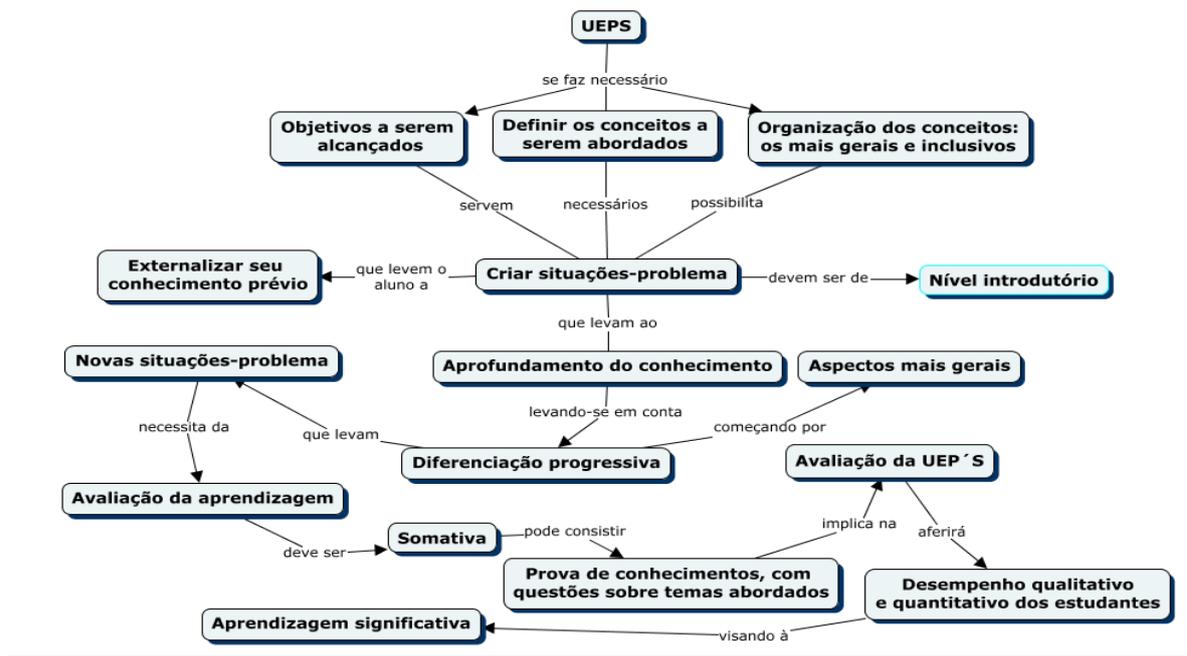
**Figura 01** – Mapa Conceitual da Entropia



Fonte: Elaborado pelo autor

## A sequência didática

Figura 02 – Mapa Conceitual da Unidade de Ensino Potencialmente Significativa



Fonte: Elaborado pelo autor

**1º Passo – Definir os conceitos específicos a serem abordados e os objetivos a serem alcançados.**

Tópicos: Entropia, e Segunda Lei da Termodinâmica.

Objetivos: compreender o conceito de Entropia, Compreender a sua relação com a Segunda Lei da Termodinâmica, como também entender de que forma o conceito de temperatura absoluta negativa implica na modificação da 2ª lei da Termodinâmica.

**2º Passo – Criar/propor situações que levem o aluno a externalizar seu conhecimento prévio (Duração: 0,5 hora/aula)**

A partir da observação das imagens, entregar para os alunos uma folha com contendo a figura 1 e as seguintes questões:

- c) O que levou a criança a dar sempre a mesma resposta, embora as situações fossem diferentes?
- d) O que acontece quando as coisas estão desarrumadas?

Figura 03 – Problematização inicial



situação inicial sobre o conceito de entropia (disponível em): [www.facebook.com/cienciaemmemes/posts/617441232084214/](http://www.facebook.com/cienciaemmemes/posts/617441232084214/)

Figura 04 – Problematização inicial



Fonte: disponível em: <http://www.fisica-interessante.com/fisica-termodinamica-entropia.html>

Embora divertida, esta associação entre entropia e o sentido de senso comum da palavra 'desordem' pode prejudicar a compreensão do conceito e ao uso incorreto da 2ª Lei da Termodinâmica. Uma relação correta cientificamente mais correta será vista no desenvolvimento desse trabalho.

Nesta etapa, trabalhamos também alguns conceitos necessários à construção de mapas conceituais.

**3º passo – Propor situações-problema em nível introdutório que levem em conta o conhecimento prévio do aluno (Duração: 0,5 hora/aula)**

- Questionamento oral do professor para o grupo de todos os alunos, anotando as respostas no quadro: O que aconteceu com a moléculas de água ao passar do estado sólido para o estado líquido? Houve realização de trabalho?

**Figura 05 – Situação-problema**

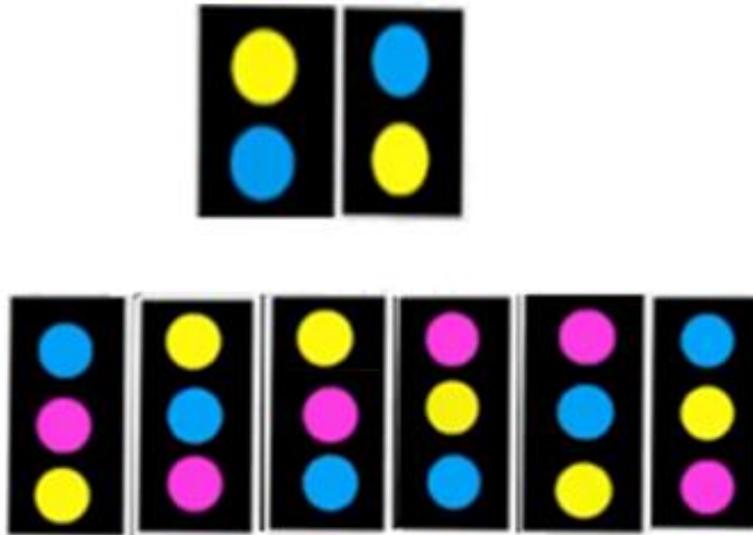


Fonte: disponível em <http://tiobill.com.br/derretendo-o-gelo/>

- Através do diálogo, partindo do que foi observado no caso da mudança de estado (Sólido para líquido) e de outros exemplos do cotidiano, introduz-se o conceito de Entropia, para que o aluno consiga entender que o sistema recebeu energia, mas não houve realização de trabalho.

- Através do diálogo, partindo do que foi observado no caso da mudança de estado (Sólido para líquido) e de outros exemplos do cotidiano, introduz-se o conceito de Entropia, para que o aluno consiga entender que o sistema recebeu energia, mas não houve a realização de trabalho.

**Figura 06** – Estados possíveis



**Fonte:** Elaborado pelo autor

A partir da apresentação da figura acima, perguntamos ao aluno quantos estados o sistema pode assumir na primeira situação e na segunda situação, mostrando que quando eu aumento meu sistema, aumento o número de combinação (estados possíveis do sistema). Quanto maior o número de estados possíveis, menos energia estará disponível para ser utilizada.

Introduzimos o conceito termodinâmico da temperatura, a partir da 1ª Lei, chegamos a

$$\Delta S = Q/T \quad (1.0)$$

A definição termodinâmica diz que alteração na entropia é igual ao calor adicionado ao sistema dividido pela temperatura na qual o calor é adicionado.

Se houver pequena alteração na temperatura e é o que acontece, podemos ver isso com a definição matemática, estatística ou combinatória da entropia onde  $\Omega$  é o número de estados que o sistema poderá suportar, este é o caso no qual todos os estados são igualmente prováveis, o que é uma situação bastante consistente

$$S = K \ln \Omega. \quad (2.0)$$

A partir do conceito de entropia, introduzimos a 2ª lei da Termodinâmica.

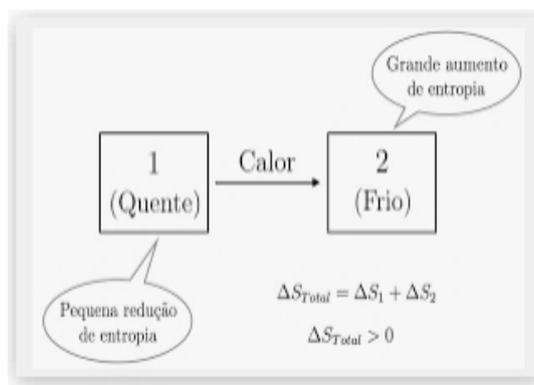
2ª Lei da Termodinâmica

$$\Delta S_U \geq 0 \quad (3.0)$$

A alteração na entropia do universo quando qualquer processo está em andamento. Isso nos diz que, quando qualquer coisa acontece no universo, o efeito líquido é que há mais entropia no universo em si.

Mostramos como num processo de transferência de calor, a entropia do universo aumenta.

**Figura 12** – Processo de transferência de calor



**Fonte:** Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Marcos Moura, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

$$\Delta S_U = \Delta S_1 + \Delta S_2 \quad (4.0)$$

$$\Delta S_U = -\frac{Q}{T_1} + \frac{Q}{T_2} \quad (5.0)$$

$$\Delta S_U = \frac{Q}{T_2} - \frac{Q}{T_1} \quad (6.0)$$

Assim, o sistema perde calor a uma temperatura  $T_1 > T_2$ . O calor será transferido do corpo quente para o corpo frio

Mostrar para aos alunos, que a definição de temperatura como a energia cinética média das moléculas, pode levar a um paradoxo quando experimentos demonstram temperatura absolutas menores que zero.

Introduzimos

Assistir ao vídeo “Temperatura absoluta negativa em sistemas quânticos” (Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=5gjeIkBlpKI>). Nesta etapa, construir o 1º mapa conceitual.

**4º Passo – uma vez trabalhadas as situações iniciais, aprofundar o conhecimento, levando-se em conta a diferenciação progressiva começando com aspectos mais gerais (Duração: 1 horas/aula)**

- Questionamento oral para todo o grupo: a) O que são processos reversíveis? O que são processos irreversíveis.

- Leitura e discussão do texto Entropia e 2ª Lei e transformações reversíveis e irreversíveis, disponíveis em <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/entropia-segunda-lei> e <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/transformacoes-reversiveis-irreversiveis.htm>, respectivamente.

**5º Passo – Em continuidade, retomar os aspectos mais gerais estruturantes, com novas situações-problema. Essa atividade pode ser a resolução de problemas, a construção de um mapa conceitual ou um diagrama em V, um experimento de laboratório, mas deve, necessariamente, envolver negociação de significados e mediação docente (Duração: 0,5 hora/aula)**

Introduzimos o conceito de que a mudança na entropia está inversamente relacionada à temperatura ou seja, em termos de equação

$$\frac{1}{t} = \frac{ds}{dE} \quad (7.0)$$

Podemos a partir de agora, aprofundar o conhecimento e construir o gráfico  $S = f(U)$ .

- Introduzir a Segunda Lei da Termodinâmica explicando qual a sua relação com Entropia: Enunciado de Clausius e enunciado de Kelvin-Planck.

- A segunda lei da termodinâmica formulada em termos quantitativos usando o conceito de entropia, o qual fornece uma estimativa da desordem do sistema.

- Entropia e temperatura absoluta negativa.

- Construção de um mapa conceitual

**6º Passo – Diferenciação progressiva retomando as características mais relevantes do conteúdo em questão, porém de uma perspectiva integradora (Duração: 0,5 hora/aula)**

- Através do diálogo e da apresentação de algumas situações, explicar as diferenças entre temperaturas absolutas positivas e temperaturas absolutas negativas, definindo temperatura do ponto de vista de entropia e energia.

- Reformulação do enunciado de Kelvin-Planck

- 2ª lei da Termodinâmica reformulada

- Construção de um mapa conceitual que envolva os conceitos de temperaturas absolutas positivas, bem com temperaturas absolutas negativas.

**7º Passo – A avaliação da aprendizagem através da UEPS deve ser feita ao longo de sua implementação, através de avaliação somativa individual (Duração: 1 hora/aula)**

- Esta avaliação pode consistir de prova de conhecimentos, com questões sobre os temas abordados. Abaixo, exemplos de questões que podem ser utilizadas:

a) a entropia de uma batata assada quente diminui à medida que ela esfria. Isso viola o princípio do aumento de entropia? Explique.

b) no caso da batata, o que sistema e o que o meio? O que forma o sistema mais o meio?

c) por que não se pode construir uma máquina com 100% de rendimento? Que grandeza física está relacionada ao fato de não se poder construir uma máquina com 100% de rendimento

d) No caso de temperaturas absolutas negativas, elas são mais frias ou mais quentes que o zero absoluto? Como isso é possível?

e) É possível, através de um número finito de operações, “reduzir” a T de qualquer sistema com  $T > 0$  ao zero absoluto?

f) Construção do mapa conceitual final.

**8º Passo – Avaliação da UEPS**

-A UEPS somente será considerada exitosa se a avaliação do desempenho dos alunos fornecer evidências de aprendizagem significativas, para isso será feita uma análise quantitativa e qualitativa sobre as atividades realizadas no desenvolvimento da UEPS, verificando se ocorreu uma aprendizagem significativa.

## Referências Bibliográficas

- MOREIRA, M. A. **Ensino e Aprendizagem Significativa**. 1ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2017.
- MOREIRA, M. A. **Teorias de Aprendizagem**. 2ed. São Paulo: EPU, 2011.
- SOUZA, GRAZIELA FERREIRA DE. **Mapas Conceituais: estratégias para ensinar e aprender significativamente**: 1 ed. Curitiba: CRV, 2021.
- H. M. NUSSENZVEIG. **Curso de Física Básica**. v.2. 4a ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2002.
- SALINA, SÍLVIO R.A. **Introdução à Física Estatística**. 2 ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2018.
- BORGES. E. P. **Irreversibilidade, desordem e incerteza**: Três visões da generalização do conceito de entropia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**: v. 21, n. 4, Dezembro de 1999.
- OLIVEIRA, M. J. de. **Termodinâmica**. São Paulo: Livraria da Física, 2005.
- MOREIRA, MARCO ANTONIO; MASINI, ELCIE FORTES SALZANO. **Aprendizagem significativa**: a teoria de David Ausubel. São Paulo: Centauro, 2006.
- MOREIRA, MARCO ANTONIO. MASINI. **Ensino e Aprendizagem significativa**:. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2017.
- MOURA, Marcos. **Entropia estatística e o ensino da segunda lei da termodinâmica**. 2016. 197 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.
- MOURA, Marcos. Material instrucional associado à dissertação de mestrado **Entropia estatística e o ensino da segunda lei da termodinâmica**. 2016. 54f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.